Régie de l'azote chez les cultures maraîchères

Guide pour une fertilisation raisonnée

Nicolas Tremblay
Hans-Christoph Scharpf
Ulrike Weier
Hélène Laurence
Josée Owen

Canada

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Agriculture and Agri-Food Canada

No. de cat. A42-92/2001F-IN
ISBN 0-662-85926-2

Table de Matières

1 Introduction 6
2 Cycle de l'azote 9
2.1 Entrées 9
2.1.1 Azote minéral du sol au printemps 9
2.1.2 Minéralisation de matière organique 11
Humus 13
Sources organiques 14
Résidus de cultures 14
Compost 16
Fumier 17
Autres engrais organiques 18
2.1.3 Précipitations 18
2.1.4 Irrigation 18
2.1.5 Fertilisation minérale 19
2.2 Sorties 19
2.2.1 Besoins des végétaux 19
Absorption 19
Marge de sécurité 20
2.2.2 Azote minéral non absorbé par la plante 23
Lessivage 23
Immobilisation 23
Dénitrification 24
Nitrification 25
Fixation de l'ammonium (NH_4^+) 25
Volatilisation du NH_3 25
3 Méthodes d'estimation des besoins en fertilisation azotée des cultures légumières 27
3.1 Méthodes fondées sur l'expérience et les observations 27
3.1.1 Expérience 27
Recommandation unique 27
Facteurs de correction 27
3.1.2 Observations 28
Couleur du feuillage des cultures 28
Parcelles non fertilisées 28
Plantes indicatrices 30
3.2 Méthodes fondées sur des calculs 30
3.2.1 Systèmes experts 31
N-Expert II 31
Conseil-Champs, Agri-Champs 31
WELL_N 32
3.2.2 Modèles de simulation 32
3.3 Méthodes fondées sur des analyses du sol et de la plante 33
3.3.1 Sol 33
3.3.2 Végétaux 34

Analyses de la sève 34
Bandelettes et réflectomètre 34
Électrodes à membrane sélective 35
Mesures de la chlorophylle 35
Capteur N-Sensor et agriculture de précision 36
Analyse de l'azote total 36
3.3.3 Utiliser les mesures de nitrate dans le sève et le sol 36
Méthode N_{min} 37
Principes 37
Utilisation de l'approche de la « valeur cible » 38
Modification de l'approche de la « valeur cible » 38
Méthode KNS 39
4 Bilan azoté 40
4.1 Utilisation du bilan azoté lors de la fertilisation 40
4.1.1 D'où viennent les valeurs? 40
Azote minéral du sol au printemps ou entre deux cultures 40
Minéralisation d'humus 42
Minéralisation de résidus de cultures 42
Absorption par la plante 43
Marge de sécurité 43
Azote immobilisé ou non disponible 43
Eaux d'irrigation 43
Lessivage 43
Précipitations et dénitrification 43
4.1.2 Exemple de calcul 44
5 Prévention du lessivage de l'azote 46
5.1 Gestion améliorée des engrais 47
5.1.1 Dose d'engrais 47
5.1.2 Manipulation des engrais (où, quand, quel type) 48
Applications fractionnées 48
Épandage d'engrais à libération lente 48
Application localisée des engrais 49
Application foliaire 49
5.2 Croissance des cultures 49
5.3 Engrais verts (ou cultures-pièges) 49
5.4 Engrais organiques 50
5.5 Autres sources d'engrais 50
5.6 Résidus de culture 50
5.6.1 Méthodes d'incorporation 50
5.7 Choix de la culture 51
5.8 Irrigation 51
5.9 Fertilisation azotée suboptimale 51
6 Réduction de la teneur en nitrates dans les parties comestibles des légumes 53
6.1 Facteurs influant sur la teneur en nitrates des parties comestibles des légumes 53
6.1.1 Fertilisation 53
6.1.2 Ensoleillement 54

6.1.3 Variété 54
6.1.4 Maturité de récolte 54
6.2 Mesures de prévention 54
6.2.1 Éviter la surfertilisation 54
6.2.2 Fertilisation azotée suboptimale 54
6.2.3 Multiples applications d'engrais 56
6.2.4 Engrais ammoniacaux 56
6.2.5 Engrais à libération lente 56
6.2.6 Récolte 56
7 Conclusions 57
Annexe I 58
Appendix II 63
8 Références 67

1 Introduction

L'azote est un élément indispensable à la croissance des végétaux. Chez ces derniers, il constitue une composante importante des protéines, des enzymes et des vitamines et est au cœur de la molécule essentielle à la photosynthèse, la chlorophylle. Il est présent dans les alcaloïdes des végétaux et dans des milliers d'autres substances revêtant une grande importance sociale et économique dans notre société.

Les végétaux absorbent l'azote sous forme d'ion nitrate (NO_3^-) et d'ion ammonium (NH_4^+) par leurs racines. La quantité d'azote absorbée par une plante dépend de nombreuses variables, y compris le stade de croissance, la teneur des autres éléments nutritifs dans le sol, la disponibilité de l'eau du sol et les conditions météorologiques. La plupart des plantes cultivées absorbent de plus grandes quantités de nitrates que d'ammonium. Contrairement à l'ammonium, les nitrates s'accumulent dans les tissus végétaux lorsque la plante absorbe plus d'azote que nécessaire à sa croissance optimale. Les nitrates sont facilement lessivés des sols par les eaux d'infiltration, tandis que l'ammonium, un ion à charge électropositive, est retenu par le sol. Sous l'effet des processus pédologiques, l'ammonium est habituellement transformé en nitrates.

L'azote n'est pas plus indispensable à la survie des végétaux que tout autre élément essentiel, mais il est toutefois nécessaire en quantités beaucoup plus grandes que la plupart des autres éléments nutritifs. De ce fait, les pratiques culturales exigent souvent des épandages importants d'engrais azotés afin d'obtenir un rendement maximal des cultures. La révolution verte, qui a permis de doubler la production alimentaire mondiale de 1950 à 1975, misait énormément sur l'utilisation de nouvelles variétés pour obtenir des rendements élevés à l'aide de pratiques culturales intensives, y compris de grandes quantités d'engrais azotés.[1] En 1950, la consommation annuelle mondiale d'engrais azotés était de 4 millions de tonnes. En 1975, elle atteignait 40 millions de tonnes.

L'apport d'azote a un effet spectaculaire sur le rendement des cultures légumières, et le coût de la fertilisation est faible en comparaison de celui d'un rendement réduit. Les agriculteurs commettent souvent l'erreur d'épandre une trop grande quantité d'engrais azoté plutôt que de risquer une fertilisation insuffisante et une perte de revenus. Il est difficile de concilier cette pratique avec la responsabilité environnementale. Bien que cette pratique pollue les sources d'approvisionnement en eau et fasse augmenter les risques pour la santé et les atteintes à l'environnement, l'agriculteur ne veut pas supporter les coûts d'une production durable qui, en raison d'une fertilisation réduite, fait baisser ses rendements et ses revenus. Le consommateur n'est pas prêt à payer plus cher pour les produits agricoles afin de compenser de tels coûts. Comment arriver à une fertilisation respectueuse de l'environnement des légumes de plein champ sans que l'agriculteur et le consommateur n'aient eux-mêmes à investir dans la protection de l'environnement?

Pour que la fertilisation soit efficace, il faut notamment éviter la surfertilisation.

Une culture qui reçoit des apports azotés excessifs peut être plus sensible à la maladie que d'autres qui ne sont pas surfertilisées[2] ou peut présenter une teneur tissulaire plus élevée en nitrates. Des teneurs élevées en nitrates influent de diverses façons sur la qualité des légumes; il a été découvert qu'une surfertilisation azotée donnait aux choux de Bruxelles un goût encore plus amer[3] (!) et entraînait la production de longues tiges indésirables. Les teneurs en vitamine C des légumes diminuent à mesure que celles en nitrates augmentent.[4,5] La surfertilisation, et le lessivage des nitrates qui s'ensuit, causent également la pollution de l'eau. L'**eutrophisation** peut résulter de la pollution par les nitrates et avoir des effets écologiques dévastateurs, et une teneur élevée en nitrates dans l'eau potable peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine et animale.

Le grand public s'inquiète des nitrates dans les légumes et l'eau potable en raison des risques potentiels pour la santé mis en évidence au cours des années 1980. Des études ont prouvé de façon irréfutable que les nitrates se combinent aux amines pour former des composés cancérogènes appelés nitrosamines. Selon d'autres résultats d'études récentes, les nitrosamines ne se forment pas lors de l'ingestion ou de la digestion de légumes riches en nitrates, et la consommation de tels légumes pourrait présenter certains avantages.[6, 7] Plusieurs études épidémiologiques n'ont pas réussi à confirmer le lien entre l'ingestion de nitrates et le cancer.[8, 9,10,11] Toutefois, ces études n'ont pas non plus prouvé l'absence de risque de cancer lié à leur consommation. Jusqu'à ce qu'il soit certain que les légumes à teneur élevée en nitrates ne comportent aucun risque pour la santé, il serait judicieux que les producteurs cultivent uniquement des légumes de qualité à faible teneur en nitrates. Une fertilisation efficace permet d'atteindre cet objectif, tout en réduisant la pollution de l'eau.

L'eutrophisation est un phénomène naturel qui se produit dans les étendues d'eau. Les éléments nutritifs présents dans l'eau, comme l'azote et le phosphore, fertilisent la flore aquatique. Les plantes et les algues prolifèrent et forment ce qu'on appelle des « fleurs d'eau ». Au fil du développement de la végétation, certains tissus vieillissent et meurent. À mesure que le nombre de plantes et d'algues augmente, la quantité de débris de ce type ou de matière organique s'accumule. Les microbes utilisent l'oxygène pour dégrader cette matière organique.

Lorsque les polluants d'origine agricole, comme l'azote et le phosphore, pénètrent dans l'eau, les plantes et les algues croissent plus vigoureusement de sorte que la matière organique s'y accumule rapidement. La décomposition de la matière organique consomme une si grande quantité d'oxygène que la concentration d'oxygène de l'eau devient très faible. Nombre de plantes et d'animaux ne peuvent survivre dans de telles conditions et meurent. Les étendues d'eau qui ont subi une grave eutrophisation sont parfois qualifiées de « mortes », parce qu'elles abritent une flore et une faune très réduites.

Pour tenter d'empêcher la surfertilisation et ses effets négatifs, certains pays ont adopté des règlements limitant la teneur en nitrates dans les légumes et sont allés, dans certains cas, jusqu'à restreindre la quantité totale d'azote qui peut être épandue sur certaines cultures. Respecter ces limites implique parfois une fertilisation sous-optimale.

La sous-fertilisation (comme le montre l'exemple) peut être, selon le point de vue, aussi indésirable que la surfertilisation. Elle est non seulement

7/6

Une culture qui reçoit des apports azotés excessifs peut être plus sensible à la maladie que d'autres qui ne sont pas surfertilisées[2] ou peut présenter une teneur tissulaire plus élevée en nitrates. Des teneurs élevées en nitrates influent de diverses façons sur la qualité des légumes; il a été découvert qu'une surfertilisation azotée donnait aux choux de Bruxelles un goût encore plus amer[3] (!) et entraînait la production de longues tiges indésirables. Les teneurs en vitamine C des légumes diminuent à mesure que celles en nitrates augmentent.[4,5] La surfertilisation, et le lessivage des nitrates qui s'ensuit, causent également la pollution de l'eau. L'**eutrophisation** peut résulter de la pollution par les nitrates et avoir des effets écologiques dévastateurs, et une teneur élevée en nitrates dans l'eau potable peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine et animale.

Le grand public s'inquiète des nitrates dans les légumes et l'eau potable en raison des risques potentiels pour la santé mis en évidence au cours des années 1980. Des études ont prouvé de façon irréfutable que les nitrates se combinent aux amines pour former des composés cancérogènes appelés nitrosamines. Selon d'autres résultats d'études récentes, les nitrosamines ne se forment pas lors de l'ingestion ou de la digestion de légumes riches en nitrates, et la consommation de tels légumes pourrait présenter certains avantages.[6, 7] Plusieurs études épidémiologiques n'ont pas réussi à confirmer le lien entre l'ingestion de nitrates et le cancer.[8, 9,10,11] Toutefois, ces études n'ont pas non plus prouvé l'absence de risque de cancer lié à leur consommation. Jusqu'à ce qu'il soit certain que les légumes à teneur élevée en nitrates ne comportent aucun risque pour la santé, il serait judicieux que les producteurs cultivent uniquement des légumes de qualité à faible teneur en nitrates. Une fertilisation efficace permet d'atteindre cet objectif, tout en réduisant la pollution de l'eau.

L'eutrophisation est un phénomène naturel qui se produit dans les étendues d'eau. Les éléments nutritifs présents dans l'eau, comme l'azote et le phosphore, fertilisent la flore aquatique. Les plantes et les algues prolifèrent et forment ce qu'on appelle des « fleurs d'eau ». Au fil du développement de la végétation, certains tissus vieillissent et meurent. À mesure que le nombre de plantes et d'algues augmente, la quantité de débris de ce type ou de matière organique s'accumule. Les microbes utilisent l'oxygène pour dégrader cette matière organique.

Lorsque les polluants d'origine agricole, comme l'azote et le phosphore, pénètrent dans l'eau, les plantes et les algues croissent plus vigoureusement de sorte que la matière organique s'y accumule rapidement. La décomposition de la matière organique consomme une si grande quantité d'oxygène que la concentration d'oxygène de l'eau devient très faible. Nombre de plantes et d'animaux ne peuvent survivre dans de telles conditions et meurent. Les étendues d'eau qui ont subi une grave eutrophisation sont parfois qualifiées de « mortes », parce qu'elles abritent une flore et une faune très réduites.

Pour tenter d'empêcher la surfertilisation et ses effets négatifs, certains pays ont adopté des règlements limitant la teneur en nitrates dans les légumes et sont allés, dans certains cas, jusqu'à restreindre la quantité totale d'azote qui peut être épandue sur certaines cultures. Respecter ces limites implique parfois une fertilisation sous-optimale.

La sous-fertilisation (comme le montre l'exemple) peut être, selon le point de vue, aussi indésirable que la surfertilisation. Elle est non seulement

coûteuse en raison de la perte de rendement qu'elle entraîne, mais elle peut également donner une récolte de moins bonne qualité. Les légumes-feuilles, comme les épinards, sont plus recherchés par les consommateurs lorsqu'ils sont d'un beau vert foncé. La sous-fertilisation peut donner des légumes-feuilles pâles et jaunis, des brassicacées de forme indésirable[12] (Babik et coll., 1996) et des légumes présentant une multitude d'autres caractéristiques qui peuvent entraîner leur déclassement et, par conséquent, une réduction de leur qualité marchande et des revenus.

Quel est le coût de la surfertilisation et de la sous-fertilisation?

Supposons que le coût de l'engrais à base de nitrate d'ammonium (34-0-0) soit de 0,40 $ par kg. Le coût d'une surfertilisation de l'ordre de 50 kg/ha d'azote serait de près de 60 $ [50 kg/ha x 100 / 34 x 0,40 $]. Une sous-fertilisation de l'ordre de 50 kg/ha permettrait d'économiser près de 60,00 $, mais, dans le cas d'une culture de chou-fleur, cela entraînerait une diminution de rendement de 15 %, correspondant à une perte de revenus de 1 750 $!

Une fertilisation azotée efficace des légumes de plein champ n'apportant ni trop peu ni un excès d'azote est la situation idéale. Au Québec, certaines approches largement utilisées pour déterminer les doses d'engrais ne peuvent être efficaces. Elles se fondent sur des recommandations établies à partir des valeurs moyennes des besoins des cultures. Elles ont souvent pour résultat l'épandage d'une dose d'engrais correspondant au total des apports nécessaires à la plante et ne tiennent pas compte de l'azote du sol, des résidus de culture, de l'eau d'irrigation et d'une multitude d'autres sources. Elles négligent également les processus qui, dans le sol, concurrencent la culture pour l'azote. En règle générale, nous pensons que les besoins des cultures équivalent à la quantité absorbée. En fait, une quantité d'azote dépassant la quantité assimilée par un plant est nécessaire à une croissance optimale et devrait être prise en considération dans les besoins de la culture.

Le présent guide, rédigé à l'intention des agriculteurs et des professionnels de l'agriculture, se veut un aide-mémoire sur la fertilisation azotée des légumes de plein champ. Il traite de différentes méthodes permettant une fertilisation efficace, selon les objectifs du producteur – que ce soit la durabilité de l'environnement, la rentabilité ou l'amélioration de la qualité du produit – et présente des descriptions détaillées des méthodes d'estimation des entrées et des sorties d'azote ainsi que des méthodes de calcul du bilan de l'azote. Le guide décrit certains outils qui peuvent servir à évaluer le bilan azoté du sol et des végétaux. Il explore la gestion de la teneur en nitrates dans les tissus des légumes en raison du peu données à ce sujet. Le lecteur remarquera que le guide fait souvent référence à des études, à des exemples et à des situations de l'Allemagne et du Québec. Même si le contexte se limite souvent à ces deux pays, les concepts et les grands principes sont largement applicables partout en Europe et en Amérique du Nord.

coûteuse en raison de la perte de rendement qu'elle entraîne, mais elle peut également donner une récolte de moins bonne qualité. Les légumes-feuilles, comme les épinards, sont plus recherchés par les consommateurs lorsqu'ils sont d'un beau vert foncé. La sous-fertilisation peut donner des légumes-feuilles pâles et jaunis, des brassicacées de forme indésirable[12] (Babik et coll., 1996) et des légumes présentant une multitude d'autres caractéristiques qui peuvent entraîner leur déclassement et, par conséquent, une réduction de leur qualité marchande et des revenus.

Quel est le coût de la surfertilisation et de la sous-fertilisation?

Supposons que le coût de l'engrais à base de nitrate d'ammonium (34-0-0) soit de 0,40 $ par kg. Le coût d'une surfertilisation de l'ordre de 50 kg/ha d'azote serait de près de 60 $ [50 kg/ha x 100 / 34 x 0,40 $]. Une sous-fertilisation de l'ordre de 50 kg/ha permettrait d'économiser près de 60,00 $, mais, dans le cas d'une culture de chou-fleur, cela entraînerait une diminution de rendement de 15 %, correspondant à une perte de revenus de 1 750 $!

Une fertilisation azotée efficace des légumes de plein champ n'apportant ni trop peu ni un excès d'azote est la situation idéale. Au Québec, certaines approches largement utilisées pour déterminer les doses d'engrais ne peuvent être efficaces. Elles se fondent sur des recommandations établies à partir des valeurs moyennes des besoins des cultures. Elles ont souvent pour résultat l'épandage d'une dose d'engrais correspondant au total des apports nécessaires à la plante et ne tiennent pas compte de l'azote du sol, des résidus de culture, de l'eau d'irrigation et d'une multitude d'autres sources. Elles négligent également les processus qui, dans le sol, concurrencent la culture pour l'azote. En règle générale, nous pensons que les besoins des cultures équivalent à la quantité absorbée. En fait, une quantité d'azote dépassant la quantité assimilée par un plant est nécessaire à une croissance optimale et devrait être prise en considération dans les besoins de la culture.

Le présent guide, rédigé à l'intention des agriculteurs et des professionnels de l'agriculture, se veut un aide-mémoire sur la fertilisation azotée des légumes de plein champ. Il traite de différentes méthodes permettant une fertilisation efficace, selon les objectifs du producteur – que ce soit la durabilité de l'environnement, la rentabilité ou l'amélioration de la qualité du produit – et présente des descriptions détaillées des méthodes d'estimation des entrées et des sorties d'azote ainsi que des méthodes de calcul du bilan de l'azote. Le guide décrit certains outils qui peuvent servir à évaluer le bilan azoté du sol et des végétaux. Il explore la gestion de la teneur en nitrates dans les tissus des légumes en raison du peu données à ce sujet. Le lecteur remarquera que le guide fait souvent référence à des études, à des exemples et à des situations de l'Allemagne et du Québec. Même si le contexte se limite souvent à ces deux pays, les concepts et les grands principes sont largement applicables partout en Europe et en Amérique du Nord.

2 Cycle de l'azote

La croissance des végétaux est tributaire du cycle des éléments nutritifs dans l'environnement. En réalité, ces cycles complexes ne sont pas indépendants. Le cycle de l'azote ne peut se dérouler sans le cycle du phosphore, et les végétaux sont des composantes importantes de ces cycles, de celui du carbone et d'une multitude d'autres. Toutefois, il est utile d'examiner les principaux aspects du seul cycle de l'azote pour examiner la gestion de l'azote dans la production légumière. De cette manière, nous pouvons cerner les processus qui apportent au sol l'azote assimilable par les cultures et nécessaire à leur croissance (ou entrées) et les processus qui libèrent et rendent l'azote indisponible (ou sorties). La manipulation de ces entrées et de ces sorties nous permet de modifier le bilan de l'azote dans le sol. Pour que la gestion de la fertilisation azotée soit efficace, il faut faire l'équilibre entre les entrées et les sorties.

2.1 Entrées

Nous avons tendance à considérer que les apports culturaux sont seulement les matières activement épandues sur le sol, comme la fumure et les engrais. En fait, les entrées d'azote proviennent d'autres sources; ainsi, la matière organique du sol libère de l'azote. En production légumière, la gestion de l'azote exige de comprendre la contribution de ces processus à l'environnement sol-végétaux.

2.1.1 Azote minéral du sol au printemps

La teneur en azote minéral du sol au printemps pourrait être importante, contrairement à une opinion répandue selon laquelle elle serait faible ou nulle. Elle est fonction de nombreux facteurs, y compris le type de culture antérieure, l'historique de la fertilisation, la quantité de précipitations hivernales ainsi que la teneur en humus, la texture et la température du sol.

La prise en compte de l'apport d'azote minéral du sol au printemps est plus importante en production légumière que dans de nombreux autres systèmes culturaux. Ainsi, des recherches ont montré que les cultures légumières laissaient derrière elles une plus grande quantité d'azote minéral au bénéfice de la prochaine culture que les cultures céréalières (figure 2). La figure 2 montre que l'azote total présent à l'automne dans les deux premiers mètres du sol de champs toujours consacrés à la culture légumière était de 765 kg N/ha. Cette teneur en azote peut sembler très élevée, mais, en 1985, année où cette étude a été réalisée, elle était caractéristique des champs où des légumes étaient cultivés depuis nombre d'années et où les apports fertilisants ne tenaient pas compte de l'azote minéral du sol au printemps.

Le reliquat d'azote du sol à l'automne risque d'être lessivé par les précipitations automnales ainsi que par la fonte des neiges et les pluies du printemps. Le lessivage peut être important avant qu'arrive la période printanière des semis, et les systèmes racinaires peu étendus des semis ou des plants repiqués sont incapables d'absorber une grande partie de ce reliquat d'azote. La texture du sol influe également sur la quantité d'azote disponible tôt en saison. Les sols à texture grossière ont des pores de grande taille et une superficie particulaire moins

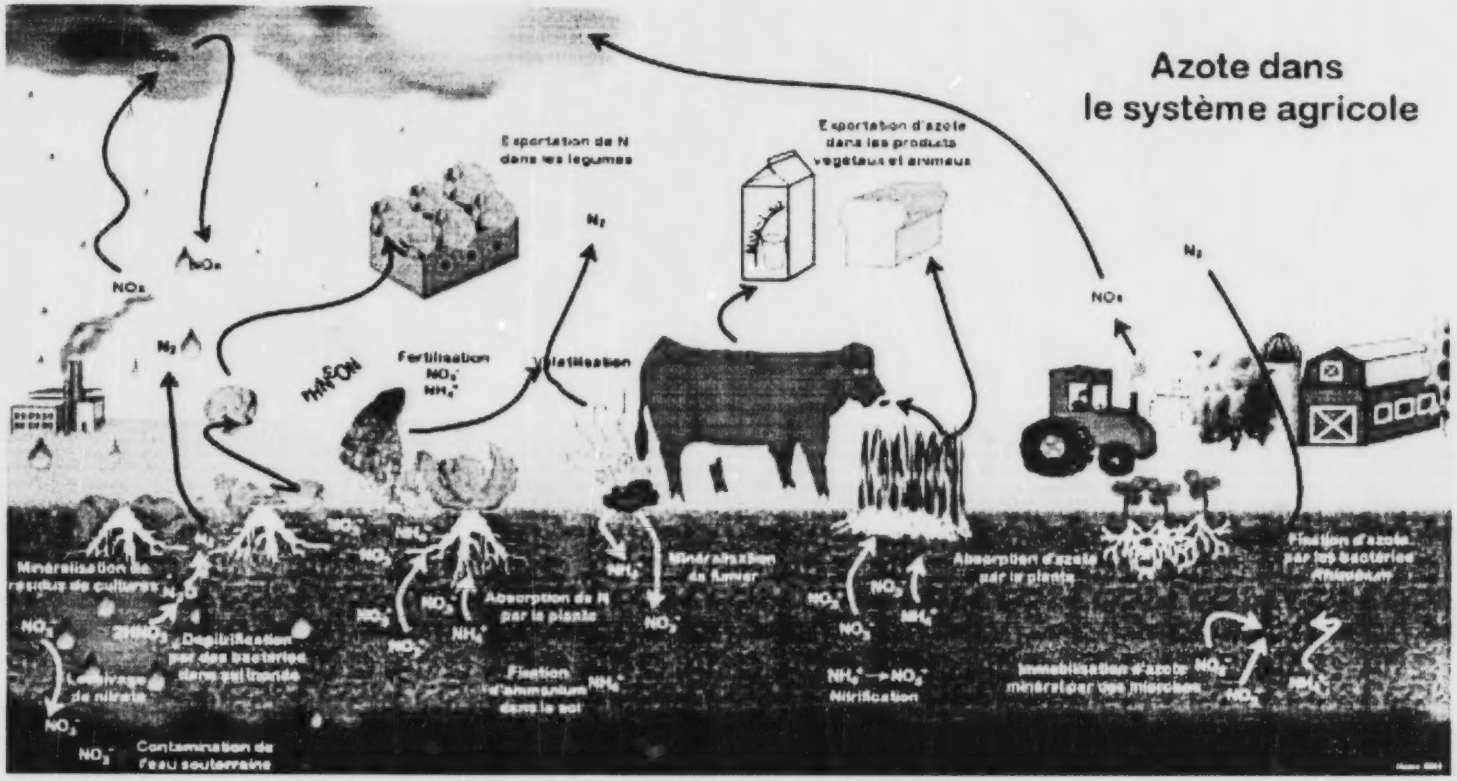
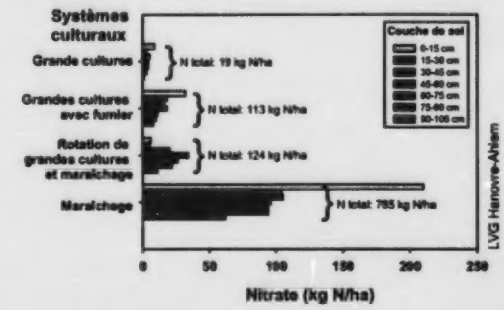


Figure 1 : Le cycle d'azote dans le système agricole

Figure 2

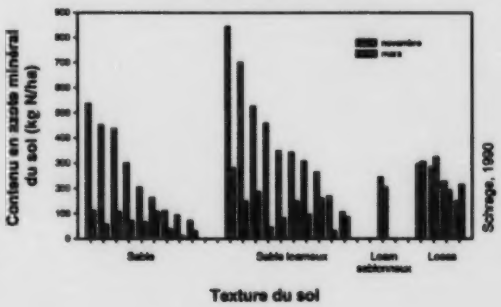
Quantité de nitrate dans différentes couches de sol au mois d'octobre pour quatre systèmes culturaux



importante. Ils se caractérisent aussi par une faible capacité au champ et un drainage rapide. La combinaison de ces propriétés a pour résultat que l'eau se déplace beaucoup plus rapidement dans un sol à texture grossière que dans un sol à texture fine, entraînant avec elle l'azote, sous forme de nitrates (NO_3^-). Dans le cadre d'une étude menée en Allemagne, des sols à texture grossière (sables et sables loameux) ont perdu une plus grande partie de leur azote pendant l'hiver (novembre à mars) que des sols à texture fine (figure 3).

Figure 3

Contenu en azote minéral de différents champs de légumes à l'automne et au printemps suivant selon la texture du sol



La teneur en azote des sols limoneux était en réalité plus élevée au printemps qu'à l'automne précédent, car la quantité d'azote minéralisée était supérieure à celle perdue par lessivage.

Au Canada, les hivers sont beaucoup plus sévères qu'en Allemagne. Cette situation peut laisser supposer que le contenu en azote du sol ne change pas pendant la longue période de gel du sol. En réalité, des recherches menées en Alberta ont montré que le contenu en azote minéral du sol augmente lorsque le sol est gelé et qu'il diminue lors du dégel (tableau 1).[13] L'azote minéralisé au cours de l'automne et nitrifié dans le sol gelé est dénitrifié au printemps ou perdu par lessivage (figure 4). Dans l'étude albertaine menée sur des champs de céréales ou de jachères, le contenu en azote du sol n'a été que très peu modifié de l'automne au printemps, bien que certains gains et pertes se sont produits pendant l'hiver et la période de dégel (tableau 2). Comment donc les grandes quantités de résidus maraîchers se comportent-ils à cet égard dans des conditions similaires ? Cette question n'est pas encore résolue et nécessite des recherches.

2.1.2 Minéralisation de matière organique

Le sol contient une certaine quantité de matière organique. Lors de la minéralisation, l'azote lié à la matière organique se transforme, sous l'effet de l'activité microbienne, en azote inorganique (minéral). Les nitrates (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+) sont les formes d'azote inorganique et les seules que les végétaux peuvent absorber en quantités importantes de la solution de sol. La minéralisation se déroule

Figure 4 : Facteurs influençant le contenu en azote minéral du sol sous les conditions d'un hiver canadien

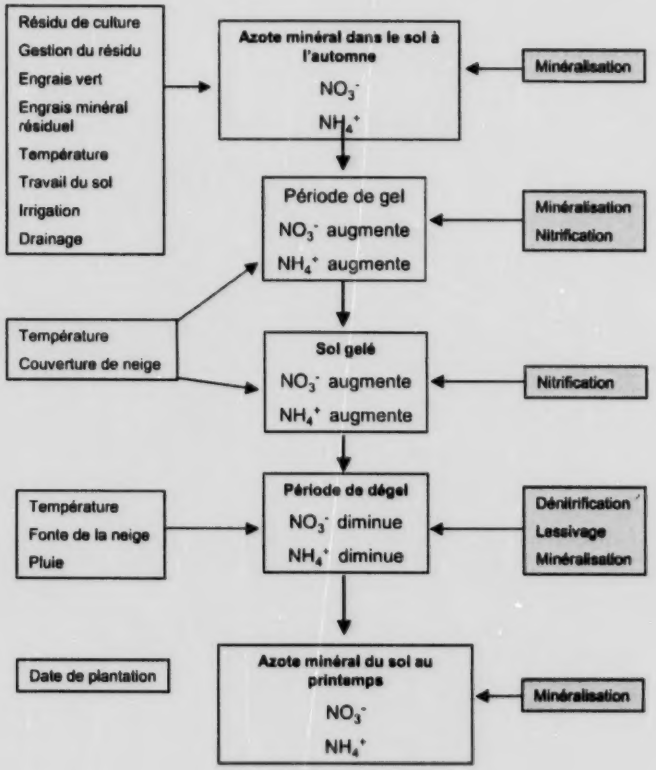


Tableau 1 : Variation nette du contenu en azote minéral du sol pendant les périodes de gel, de sol gelé et de dégel en Alberta

Azote minéral (kg N/ha)						
Couche de sol	Variation nette					
	Période de gel		Période de sol gelé		Période de dégel	
(cm)	NH_4-N	NO_3-N	NH_4-N	NO_3-N	NH_4-N	NO_3-N
0-60	20	28	14	14	-22	-17
0-120	24	31	14	17	-23	-21

Adapté de : Malhi and Nyborg, 1986

Tableau 2 : Contenu en nitrate du sol pendant l'hiver suivant une saison de jachère ou de production de céréales en Alberta

Contenu en nitrate du sol (kg N/ha)				
Couche de sol (cm)	Échantillonnage à l'automne avant le gel du sol	Échantillonnage du sol gelé	Dernier échantillonnage avant le dégel	Échantillonnage après le dégel
Champs avec chaume (six sites)				
0-30	17	31	39	23
30-60	8	9	13	9
60-90	4	5	6	5
90-120	3	3	4	3
0-120	**32**	**48**	**62**	**40**
Champs en jachères (deux sites)				
0-30	50	62	89	48
30-60	14	16	19	16
60-90	12	12	12	12
90-120	6	6	6	8
0-120	**82**	**96**	**126**	**82**

Adapté de : Malhi and Nyborg, 1986

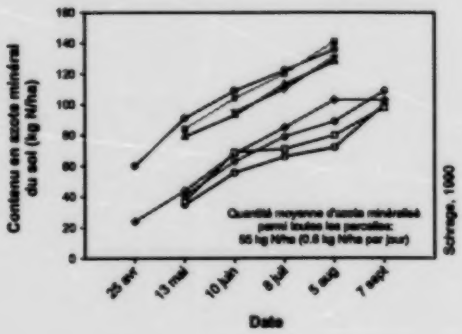
naturellement près de la surface du sol où les conditions sont favorables à l'activité microbienne. Les résidus de culture, les engrais verts, le compost, le fumier et d'autres types de fertilisant organique fournissent aux cultures sur pied de l'azote par l'intermédiaire de la minéralisation.

Humus

La matière organique se compose de plusieurs éléments, y compris la matière organique fraîche, facile à décomposer, ainsi que l'humus. Le terme « humus » désigne un certain nombre de composantes stables, plus résistantes à la minéralisation que la matière organique fraîche parce qu'elles ont déjà subi une certaine minéralisation et contiennent très peu d'azote. Malgré sa nature résistante, l'humus libère régulièrement une petite quantité d'azote minéral. En Allemagne, des chercheurs ont mesuré l'azote libéré d'avril à septembre par l' humus dans des champs en jachère protégés par des abris installés à 50 cm au-dessus du sol (figure 5). Aucune matière organique fraîche ne se trouvait à la surface du sol des jachères, et les abris empêchaient les pertes de nitrates dues à la percolation de l'eau provenant des précipitations. Dans de telles conditions, l'azote mesuré provenait nécessairement de la minéralisation de l'humus dans le sol, et l'effet cumulatif a montré que de l'azote était libéré pendant toute la période. Les différences des taux de transformation de l'azote peuvent s'expliquer par des variations de la teneur en humus, de la température, de l'humidité et de la densité apparente et d'autres caractéristiques des sols. Une humidité et une teneur adéquates en oxygène ainsi que des températures chaudes favorisent la minéralisation.

Figure 5

Quantité cumulative d'azote minéralisé dans des champs de légumes placés en jachère



En Europe de l'Ouest, le taux moyen de minéralisation est de 5 kg N/ha par semaine dans les champs de légumes à teneur en matière organique de 2 à 4 %.[14,15] Cette valeur a été établie à la lumière des résultats de nombreuses études menés dans différents sols et dans diverses conditions naturelles.

Au Québec, certains agronomes utilisent une règle empirique pour calculer l'apport d'azote provenant de la minéralisation de la matière organique du sol. Selon cette règle, chaque 1 % de matière organique du sol libère 15 kg N/ha pendant la saison de croissance. Ainsi, un sol à teneur en matière organique de 5,5 % libère (5,5 x 15) 82,5 kg N/ha au fil de la saison. Cette règle est utilisée pour modifier les recommandations normalisées présentées dans les grilles de référence en fertilisation élaborées par le CPVQ.[16] Ces recommandations partent de l'hypothèse que le sol a une teneur moyenne en matière organique de 4 % et tiennent compte de la minéralisation provenant de ce 4 % de matière organique. Par conséquent, lorsqu'ils formulent des recommandations de fertilisation, les agronomes de la

province ajoutent seulement 15 kg N/ha pour chaque point de pourcentage qui dépasse 4 %.

Cette règle empirique comporte plusieurs inconvénients. Ainsi, elle présume que plus la teneur en matière organique du sol sera élevée, plus la minéralisation sera importante. En réalité, une teneur très élevée en matière organique dans le sol peut indiquer un mauvais drainage ou le compactage, deux facteurs qui peuvent ralentir la vitesse de minéralisation. De plus, cette règle ne tient pas compte des différences que présente la saison de croissance au Québec. Enfin, elle a été conçue en fonction des grilles de fertilisation du CPVQ et pourrait ne pas convenir aux calculs des recommandations de fertilisation azotée faisant appel à des méthodes comme le bilan de l'azote. Le chiffre de 5 kg N/ha par semaine, estimé à partir d'études approfondies menées dans de nombreuses conditions, semble plus utile et est facilement adaptable à des saisons de croissance de durée variable.

Sources organiques

L'application ou l'incorporation de résidus de culture, d'engrais verts, de compost, de fumier complet et d'engrais organiques fournit de l'azote aux cultures, à mesure que ces matières organiques se minéralisent. Exception faite des engrais chimiques, les résidus de culture et les engrais verts constituent la plus importante source potentielle d'azote minéral pour les cultures légumières.

Résidus de cultures

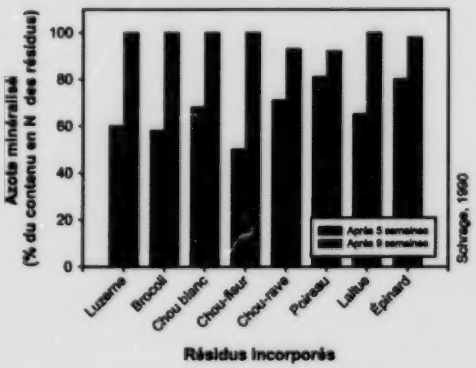
Les résidus de culture frais et les engrais verts (plantes cultivées expressément pour être incorporées au sol dont elles enrichissent la teneur en matière organique) se décomposent très rapidement si la température du sol est suffisamment élevée. En Europe de l'Ouest, dans des conditions météorologiques estivales normales, 70 % de l'azote présent sous forme organique dans les résidus de culture devient assimilable par la culture suivante pendant les 10 semaines suivant l'incorporation. Toutefois, la quantité d'azote qui se minéralise et la période pendant laquelle cette minéralisation se produit peuvent varier énormément.

Lors d'une étude menée en Europe de l'Ouest, plus de 80 % de l'azote minéral présent dans les résidus de culture avait été libéré dans les 5 à 9 semaines suivant l'incorporation (figure 6). Il importe de souligner que les taux élevés de minéralisation dont il est fait mention dans la présente étude étaient attribuables à des conditions exceptionnellement bonnes : le sol était chaud, humide et très bien aéré.

La température et la méthode d'incorporation peuvent influer sur la quantité d'azote qui se minéralise

Figure 6

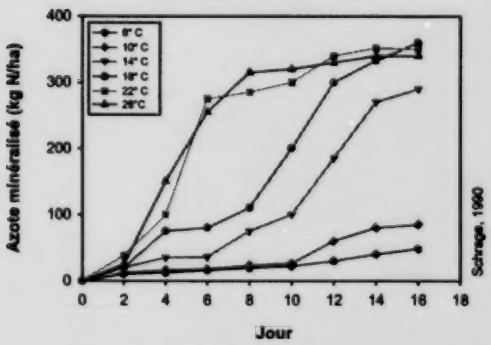
Minéralisation de l'azote contenu dans des résidus de cultures légumières après cinq ou neuf semaines d'incubation



rapidement à partir de la matière organique fraîche. Des températures chaudes favorisent l'activité microbienne, et l'incorporation permet de mettre les microbes du sol directement en contact avec les résidus. Dans le cadre d'une étude, des chercheurs ont démontré les effets de la température sur la libération d'azote minéral par les résidus de culture en faisant incuber l'équivalent de 359 kg N/ha sous forme de feuilles de chou-fleur dans le sol (figure 7). Plus la température est élevée, plus la minéralisation est rapide. Cette étude consistait en un essai d'incubation dont les conditions d'humidité et d'aération étaient strictement contrôlées. Les fluctuations de l'humidité, de l'aération et d'autres facteurs sur le terrain atténuent les effets de la température, et la minéralisation est beaucoup plus lente.

Figure 7

Quantité cumulative d'azote libérée par la minéralisation de résidus de chou-fleur* à différentes températures



* Le contenu total en N des feuilles incubées à chaque température était de 360 kg N.

L'incorporation accélère également la minéralisation, car elle met les microbes du sol directement en contact avec les résidus. La taille des résidus joue un rôle aussi. La surface exposée à l'activité microbienne est plus grande chez les résidus finement broyés que chez les résidus plus gros, et la décomposition se produit donc plus rapidement.

Toutefois, la composition des tissus eux-mêmes influe dans une plus grande mesure sur les différences de taux de minéralisation des résidus de différentes cultures. Selon les constatations d'une étude portant sur des résidus finement et grossièrement broyés de cultures légumières, des végétaux à teneur relativement faible en lignine et en hémicellulose, comme les épinards, se minéralisaient plus rapidement que les résidus culturaux présentant des pourcentages plus élevés de ces composés. Ces substances entrent dans la composition des parois cellulaires et sont très résistantes à l'activité microbienne.[17]

Les résidus de culture et les engrais verts peuvent libérer d'importantes quantités d'azote, selon la composition des résidus et les facteurs du milieu qui influent sur la minéralisation. La méthode de gestion de la matière organique fraîche, qu'il s'agisse de résidus de culture ou d'engrais verts, est déterminante, car elle entraîne soit l'utilisation de l'azote minéralisé par la prochaine culture, soit son déplacement vers des couches plus profondes du sol et la nappe phréatique où il n'est plus disponible pour les végétaux.

Dans le cadre d'une étude effectuée au Québec, des résidus de chou-fleur et de chou rouge ont été soumis à quatre traitements différents : les résidus ont été enlevés du champ (témoin); incorporés au sol à l'automne; laissés à la surface du champ en automne; ou incorporés au sol au printemps.[18] Du blé a ensuite été semé dans tous les sites. Les résidus ont

fourni de 10 à 30 % (de 6 à 18 kg N/ha) de leur teneur originale en azote aux plants de blé en croissance. L'incorporation automnale au sol a permis d'apporter de façon plus constante des quantités importantes d'azote au blé, mais les deux méthodes utilisées à l'automne ont aussi entraîné des pertes importantes par lessivage, contrairement à l'incorporation printanière.

Les résidus de culture peuvent apporter une quantité importante d'azote minéral au sol, souvent de plus de 100 kg/ha (tableau 3). La plupart des espèces cultivées fournissent en moyenne 3 kg d'azote minéral par tonne de biomasse fraîche (tissu végétal). En raison de leur relation symbiotique avec *Rhizobium*, des bactéries fixatrices d'azote, les légumineuses libèrent une plus grande quantité d'azote minéral que les autres cultures lorsqu'elles se décomposent – une moyenne de 5 kg/tonne de biomasse fraîche.

Table 3: Potential nitrogen mineralisation from crop residues

Crop	Fresh biomass normally incorporated after harvest (t/ha)	Potential nitrogen from mineralisation (kg/ha)
Brussels sprouts	50-60	150-200
Cabbage, red Cabbage, white (processing)	40-50	120-150
Broccoli Cabbage, Chinese Cabbage, Savoy Cabbage, white (fresh) Cauliflower Fennel Peas	30-40	90-120
Beans Carrots Celery Lettuce, iceberg	20-30	60-90
Kohlrabi Leeks Spinach	10-20	30-90
Corn salad Lettuce Radish, red Radish, white	< 10	< 30

Scharpf, 1991

Compost

En règle générale, le compost fournit proportionnellement moins d'azote minéral que les résidus de culture et les engrais verts. Lors du compostage, la matière fraîche facilement dégradable se décompose. Une partie de l'azote se volatilise, et la matière organique restante est relativement résistante à la minéralisation. Toutefois, le compost contient une faible quantité d'azote minéral immédiatement assimilable par les végétaux.

Lors d'un essai au champ, des composts d'origines variées ont été appliqués à raison de 150 kg N total/ha dans différentes parcelles qui ont ensuite été ensemencées de ray-grass. Aucun autre engrais azoté n'a été épandu. Certaines parcelles ont connu une augmentation nette de l'azote du sol provenant de la minéralisation du compost, tandis que, dans d'autres parcelles (composts 3 et 4), des micro-organismes ont immobilisé une plus grande quantité d'azote que celle libérée lors de la minéralisation (figure 8). Le

fourni de 10 à 30 % (de 6 à 18 kg N/ha) de leur teneur originale en azote aux plants de blé en croissance. L'incorporation automnale au sol a permis d'apporter de façon plus constante des quantités importantes d'azote au blé, mais les deux méthodes utilisées à l'automne ont aussi entraîné des pertes importantes par lessivage, contrairement à l'incorporation printanière.

Les résidus de culture peuvent apporter une quantité importante d'azote minéral au sol, souvent de plus de 100 kg/ha (tableau 3). La plupart des espèces cultivées fournissent en moyenne 3 kg d'azote minéral par tonne de biomasse fraîche (tissu végétal). En raison de leur relation symbiotique avec *Rhizobium*, des bactéries fixatrices d'azote, les légumineuses libèrent une plus grande quantité d'azote minéral que les autres cultures lorsqu'elles se décomposent – une moyenne de 5 kg/tonne de biomasse fraîche.

Table 3: Potential nitrogen mineralisation from crop residues

Crop	Fresh biomass normally incorporated after harvest (t/ha)	Potential nitrogen from mineralisation (kg/ha)
Brussels sprouts	50-60	150-200
Cabbage, red Cabbage, white (processing)	40-50	120-150
Broccoli Cabbage, Chinese Cabbage, Savoy Cabbage, white (fresh) Cauliflower Fennel Peas	30-40	90-120
Beans Carrots Celery Lettuce, iceberg	20-30	60-90
Kohlrabi Leeks Spinach	10-20	30-90
Corn salad Lettuce Radish, red Radish, white	< 10	< 30

Scharpf, 1991

Compost

En règle générale, le compost fournit proportionnellement moins d'azote minéral que les résidus de culture et les engrais verts. Lors du compostage, la matière fraîche facilement dégradable se décompose. Une partie de l'azote se volatilise, et la matière organique restante est relativement résistante à la minéralisation. Toutefois, le compost contient une faible quantité d'azote minéral immédiatement assimilable par les végétaux.

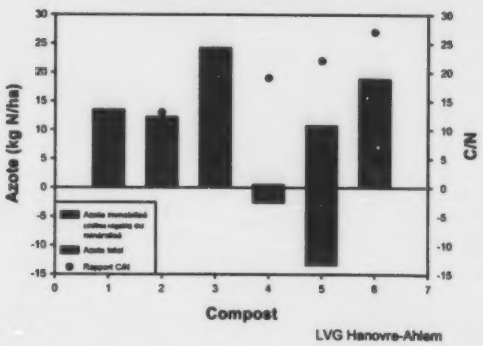
Lors d'un essai au champ, des composts d'origines variées ont été appliqués à raison de 150 kg N total/ha dans différentes parcelles qui ont ensuite été ensemencées de ray-grass. Aucun autre engrais azoté n'a été épandu. Certaines parcelles ont connu une augmentation nette de l'azote du sol provenant de la minéralisation du compost, tandis que, dans d'autres parcelles (composts 3 et 4), des micro-organismes ont immobilisé une plus grande quantité d'azote que celle libérée lors de la minéralisation (figure 8). Le

rapport carbone-azote (C/N) du compost influe énormément sur l'immobilisation. Les composts ayant un rapport C/N faible ont libéré les quantités les plus importantes d'azote minéralisé.

L'application de compost, bien qu'elle soit théoriquement une bonne pratique agricole, apporte peu d'azote minéral et peut même entraîner l'immobilisation de l'azote du sol au détriment de la culture. Cependant, des applications annuelles de compost améliorent indirectement la quantité disponible d'azote organique, car elle accroît la teneur en humus du sol, y créant des conditions physiques propices à l'activité microbienne. Des essais en laboratoire permettent d'évaluer la valeur azotée du compost.

Figure 8

Minéralisation ou immobilisation nette de l'azote contenu dans des composts de différents rapports C/N



LVG Hanovre-Ahlem

Fumier

Le fumier est un excellent amendement organique des productions végétales. Il contient de l'azote sous forme minérale et organique ainsi que de nombreux autres éléments nutritifs. La gestion des fumiers est une science très complexe; le fumier a une composition différente selon son origine, et des facteurs comme la méthode et la durée d'entreposage ainsi que la méthode d'épandage influent tous sur sa composition.

Le fumier a été reconnu au Québec et ailleurs que le fumier était une ressource mal gérée. Il contient quantité d'éléments nutritifs, mais est pourtant souvent considéré comme un sous-produit de l'élevage, des déchets dont il faut simplement se débarrasser. Lorsque le fumier est épandu incorrectement, ses bienfaits comme matière fertilisante ne sont souvent pas pris en compte, et les éléments nutritifs qu'il contient aboutissent souvent dans les fossés, les cours d'eau et les eaux souterraines.

Des règlements comme le *Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole* (*RRPOA*) exige que le fumier soit manipulé de manière à réduire le plus possible la pollution, notamment la pollution par les nitrates et le phosphore des eaux souterraines.[19] À cette fin, le *RRPOA* établit des limites sur la quantité de fumier qui peut être épandue sur les terres cultivées en se basant sur la teneur en azote du fumier. Le vaste domaine de la gestion des fumiers dépasse le cadre du présent guide, mais il faut tenir compte de certains points.

Il est possible d'estimer la teneur en azote du fumier à partir de tables normalisées.[20] Les valeurs de ces tables peuvent toutefois ne pas refléter fidèlement la composition du fumier dont il s'agit. La teneur en azote peut varier considérablement selon les pratiques d'élevage, y compris les différences de rations, de litière et d'entreposage du fumier. Il peut être préférable de faire analyser un échantillon de fumier. Il existe des protocoles décrivant les méthodes qu'il

faut utiliser pour échantillonner le fumier.[21] Au Québec, on calcule ensuite la quantité d'azote à l'aide d'indices en tenant compte de divers facteurs. Les tables d'indices et les méthodes de calcul figurent dans.[16, 21]

Jusqu'à 50 % de l'azote présent dans le lisier liquide et dans le fumier de volaille est sous forme d'ammonium et donc facilement disponible pour les végétaux. Le taux de minéralisation de l'azote organique, qui se trouve dans les particules solides du lisier liquide et du fumier semi-liquide (boues liquides) et qui constitue un pourcentage important des fumiers complets, est comparable à celui de l'azote organique du compost.

Autres engrais organiques

D'autres types d'engrais organiques, comme les plumes, la viande, les carapaces de crabe, les résidus de poisson, le tourteau de coton et le lactosérum en poudre, sont surtout utilisés par les agriculteurs « biologiques ». Ces matières ont entraîné des augmentations de 57 à 83 % du poids sec des végétaux ainsi traités en comparaison de plants non fertilisés.[22] Toutefois, puisque la composition de ces matières est complexe et variable, il est difficile d'en comparer l'efficacité relative ainsi que l'efficacité par rapport à des engrais minéraux. Les effets sur la croissance de ces matières fertilisantes sont-ils dus à la disponibilité de l'azote? La présence d'autres minéraux pourraient bien en être à l'origine. La vitesse de minéralisation de l'azote de ces matières est généralement plus lente que celle des engrais de synthèse, mais elle peut varier sensiblement selon les caractéristiques du produit. Ainsi, selon les résultats d'une étude utilisant des plumes comme matière fertilisante, des plumes réduites en particules de 0,5 mm, plutôt que de 1,0 mm, ont libéré près du double de la quantité d'azote en moitié moins de temps. Ces mêmes particules de plumes se sont transformées en un engrais à libération lente sous l'effet de l'hydrolyse microbienne.[23]

2.1.3 Précipitations

L'utilisation de combustibles fossiles par les automobiles, les secteurs de la production d'énergie et diverses autres activités produisent des oxydes d'azote (NO_x) qui sont rejetés dans l'air. Ces substances s'y transforment en acide nitrique avant de retomber sur le sol sous formes de précipitations, de gaz et de poussières acides. Aux États-Unis, des chercheurs du National Atmospheric Deposition Program ont mesuré la quantité d'azote apportée chaque année par les retombées humides, ou les précipitations. L'apport d'azote, sous forme d'ammoniac, d'ammonium et de nitrates, varie de moins de 1 kg N/ha à 7 kg N/ ha par année.[24] En Europe, la quantité d'azote apportée par les précipitations peut être beaucoup plus élevée; la densité de la population y est beaucoup plus forte que dans la majeure partie des États-Unis et, par conséquent, la quantité d'azote rejetée dans l'atmosphère par l'utilisation de combustibles fossiles par les particuliers et l'industrie est supérieure. Au cours des cinquante dernières années, la teneur en azote de la pluie a augmenté en Allemagne, passant de 25 à 40 kg N/ha. En Basse-Saxe, l'élevage intensif a fait augmenter les teneurs jusqu'à 120 kg N/ha en raison de la volatilisation de l'ammoniac du fumier.[25]

2.1.4 Irrigation

Les eaux d'irrigation peuvent contenir une quantité importante d'azote,

notamment dans les régions d'élevage intensif. Elles devraient être analysées régulièrement afin d'estimer leur apport d'azote.

Exemple de calcul de l'apport de N par l'irrigation:

Un sol irrigué à raison de 20 L/m^2 avec l'eau d'un puits artésien à teneur en nitrates de 50 mg/L reçoit l'équivalent de 10 kg /ha de nitrates (calcul : 20 L/m^2 x 50 mg/L x 10 000 m^2/ha x 1 kg / 1 000 000 mg). S'il y a 10 arrosages par saison, l'apport est de 100 kg/ha de nitrates dont 22,6 % (ou dans le cas présent 22,6 kg) est de l'azote, une quantité qui mérite d'être comptabilisée dans le bilan de l'azote.

2.1.5 Fertilisation minérale

Les cultures ont besoin d'une très grande quantité d'azote. Or, la quantité disponible provenant de sources naturelles (processus pédologiques, matière organique, irrigation etc.) ne suffit pas souvent à répondre à leurs besoins. Il faut donc épandre des engrais pour les combler. Le bilan de l'azote peut servir à calculer la dose d'engrais nécessaire. La différence entre les sorties et les entrées naturelles décrites ci-dessus correspond à la dose d'engrais qu'il convient d'épandre.

En raison des différences que présentent les engrais au niveau de leur composition (ammonium, nitrate, urée), de leur concentration, de leur taux de libération, de leur méthode d'épandage (à la volée ou en bandes latérales), de leur prix ainsi que de la présence et de la disponibilité d'autres éléments nutritifs ou contaminants, le choix de l'engrais dépend des besoins.

2.2 Sorties

2.2.1 Besoins des végétaux

Les besoins quantitatifs en azote des cultures légumières sont de deux ordres : 1) la quantité d'azote que la plante absorbera réellement et intégrera à sa biomasse, et 2) une quantité d'azote qui doit malgré tout être présente dans le sol afin de permettre à la culture d'atteindre son rendement maximal potentiel (marge de sécurité). Pour déterminer les besoins généraux en azote, il faut additionner ces deux valeurs.

Absorption

Plusieurs facteurs influent sur le taux d'absorption de l'azote par les cultures et sur la quantité assimilée. Un temps ensoleillé et chaud améliore l'absorption de l'azote puisque la vitesse de la photosynthèse est plus élevée dans de telles conditions. Certaines cultures, et notamment certains cultivars, ont une croissance plus rapide ou atteignent une plus grande taille que d'autres et, par conséquent, assimilent l'azote du sol plus rapidement ou en plus grandes quantités. Les besoins en azote d'une plante diffèrent aussi selon le stade de croissance. Même si les besoins en azote de la plante en tout début de croissance sont faibles (figure 9), l'apport d'azote à cette période est d'une importance capitale. Chez de nombreuses cultures, un retard de croissance attribuable à une carence en azote entraîne une diminution irréversible du rendement.[26] D'autres cultures peuvent s'en remettre, mais peuvent prendre plus de temps à atteindre la maturité, une situation qui peut être problématique lorsque la période de la récolte est cruciale.

notamment dans les régions d'élevage intensif. Elles devraient être analysées régulièrement afin d'estimer leur apport d'azote.

Exemple de calcul de l'apport de N par l'irrigation:

Un sol irrigué à raison de 20 L/m^2 avec l'eau d'un puits artésien à teneur en nitrates de 50 mg/L reçoit l'équivalent de 10 kg /ha de nitrates (calcul : 20 L/m^2 x 50 mg/L x 10 000 m^2/ha x 1 kg / 1 000 000 mg). S'il y a 10 arrosages par saison, l'apport est de 100 kg/ha de nitrates dont 22,6 % (ou dans le cas présent 22,6 kg) est de l'azote, une quantité qui mérite d'être comptabilisée dans le bilan de l'azote.

2.1.5 Fertilisation minérale

Les cultures ont besoin d'une très grande quantité d'azote. Or, la quantité disponible provenant de sources naturelles (processus pédologiques, matière organique, irrigation etc.) ne suffit pas souvent à répondre à leurs besoins. Il faut donc épandre des engrais pour les combler. Le bilan de l'azote peut servir à calculer la dose d'engrais nécessaire. La différence entre les sorties et les entrées naturelles décrites ci-dessus correspond à la dose d'engrais qu'il convient d'épandre.

En raison des différences que présentent les engrais au niveau de leur composition (ammonium, nitrate, urée), de leur concentration, de leur taux de libération, de leur méthode d'épandage (à la volée ou en bandes latérales), de leur prix ainsi que de la présence et de la disponibilité d'autres éléments nutritifs ou contaminants, le choix de l'engrais dépend des besoins.

2.2 Sorties

2.2.1 Besoins des végétaux

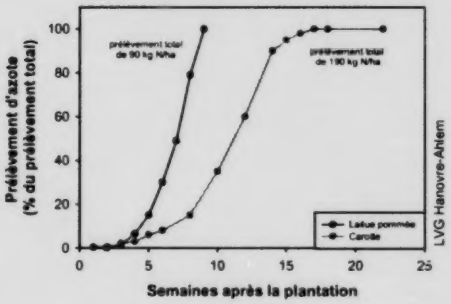
Les besoins quantitatifs en azote des cultures légumières sont de deux ordres : 1) la quantité d'azote que la plante absorbera réellement et intégrera à sa biomasse, et 2) une quantité d'azote qui doit malgré tout être présente dans le sol afin de permettre à la culture d'atteindre son rendement maximal potentiel (marge de sécurité). Pour déterminer les besoins généraux en azote, il faut additionner ces deux valeurs.

Absorption

Plusieurs facteurs influent sur le taux d'absorption de l'azote par les cultures et sur la quantité assimilée. Un temps ensoleillé et chaud améliore l'absorption de l'azote puisque la vitesse de la photosynthèse est plus élevée dans de telles conditions. Certaines cultures, et notamment certains cultivars, ont une croissance plus rapide ou atteignent une plus grande taille que d'autres et, par conséquent, assimilent l'azote du sol plus rapidement ou en plus grandes quantités. Les besoins en azote d'une plante diffèrent aussi selon le stade de croissance. Même si les besoins en azote de la plante en tout début de croissance sont faibles (figure 9), l'apport d'azote à cette période est d'une importance capitale. Chez de nombreuses cultures, un retard de croissance attribuable à une carence en azote entraîne une diminution irréversible du rendement.[26] D'autres cultures peuvent s'en remettre, mais peuvent prendre plus de temps à atteindre la maturité, une situation qui peut être problématique lorsque la période de la récolte est cruciale.

Figure 9

Prélèvement d'azote par deux cultures légumières



L'absorption d'azote par une plante, ou sa teneur en azote, est la quantité d'azote présente dans la biomasse fraîche. Elle est surtout sous forme organique et comprend l'azote du système racinaire, qui correspond à environ 10 % du poids de la portion aérienne de la plante (un pourcentage plus élevé dans le cas des légumes-racines et des tubercules). Le tableau 4 présente l'absorption totale d'azote de diverses cultures légumières. Si le rendement diffère considérablement de ces valeurs moyennes, un coefficient peut permettre de rajuster la teneur en azote.

Marge de sécurité

Même si la teneur en azote d'une plante représente une certaine partie de l'azote nécessaire à la production de biomasse, elle ne reflète pas entièrement les « besoins » généraux en azote de la plante. En fait, pour que sa croissance soit optimale, la plante a besoin d'une quantité additionnelle d'azote dans le sol, même si elle peut ne jamais l'assimiler. Cette quantité additionnelle est désignée par l'expression « marge de sécurité ».

La marge de sécurité d'une culture est définie, de manière empirique, comme étant la quantité d'azote minéral présente dans le sol au moment de la récolte, lorsqu'un rendement optimal est atteint. Selon les résultats d'études, la marge de sécurité est plus ou moins constante, et la réduire entraîne une diminution des rendements, malgré la présence permanente d'une quantité suffisante d'azote dans le sol pour combler les besoins de la culture et lui permettre d'atteindre un rendement maximal. Par conséquent, la marge de sécurité est nécessaire à un rendement optimal, mais elle n'est pas absorbée.

L'un des rôles de cette dernière est d'empêcher toute carence en azote si jamais le sol ne contenait que la quantité d'azote nécessaire à l'absorption. Dans un tel cas, des

Table 4: Approximate nitrogen uptake per tonne of yield of common vegetable crops, and the nitrogen uptake for a crop of average yield

Crop	Approximate nitrogen uptake per tonne of yield (kg N/ha)	Average yield (t/ha)	Nitrogen uptake for average yield (kg N/ha)
Beans, bush	8	12	100
Beets	5	50	250
Broccoli	13	20	260
Brussels sprouts	16	25	400
Cabbage, Chinese	3.5	70	250
Cabbage, white (early)	4	40	160
Cabbage, white (late)	3.5	80	280
Carrots	2.5	60	160
Cauliflower	7.5	35	260
Celery	4	50	200
Corn salad	4	15	60
Endive	3	40	120
Kale	5	30	150
Kohlrabi	4.5	40	180
Leeks	3.5	40	140
Lettuce, Boston	2.5	40	100
Onions	2.5	60	150
Peas	30	4	120
Radishes	3.2	25	80
Spinach	5	25	120

Scharpf, 1991

précipitations excessives pourraient lessiver une certaine quantité de cet azote et provoquer une carence. Outre la protection qu'elle assure, la marge de sécurité permet également à la plante de prélever dans le sol la totalité de la proportion d'azote nécessaire. En deçà d'une teneur critique du sol en azote, représentée par la marge de sécurité (tableau 5), l'efficacité d'une plante à prélever l'azote du sol est réduite. Les cultures à racines petites, superficielles et dotées de peu de poils absorbants (poireaux et oignons) ont de la difficulté à prélever l'azote dans le sol de sorte qu'il faut leur assurer une marge de sécurité relativement importante. À l'inverse, les plantes à systèmes racinaires longs, profonds et étendus et à longue durée de végétation n'ont besoin que d'une marge de sécurité restreinte.

Table 5: Safety margin of nitrogen required for some vegetable crops

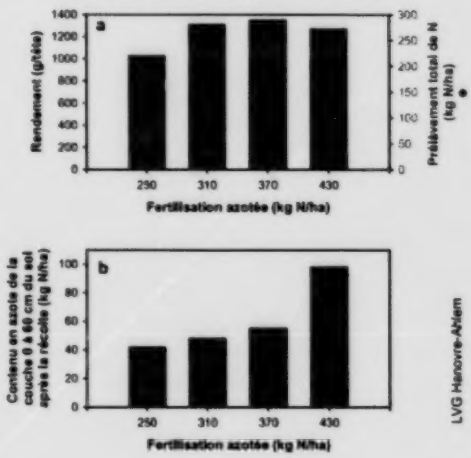
Mineral nitrogen required in rooted soil layer until harvest (Safety margin)		
< 30 kg N/ha	30 to 60 kg N/ha	60-90 kg N/ha
Brussels sprouts	Beans	Broccoli, early
Cabbage, late	Beets	Cauliflower
Carrots, late	Broccoli, late	Leek
	Cabbage, Chinese	Onion
	Cabbage, early	Spinach
	Carrots, early	
	Celery	
	Endive	
	Kale, curly	
	Kohlrabi	
	Lettuce, head	
	Lettuce, iceberg	
	Radicchio	
	Radish	

Adapted from Scharpf, 1991

Il faut que la marge de sécurité demeure la plus basse possible, tout en assurant une croissance maximale. Dans le cadre d'une étude, une culture de chou-fleur a continué de réagir positivement à des apports d'azote jusqu'à ce que 370 kg N /ha aient été épandus (figure 10). Puisque le rendement n'a pas augmenté au-delà de cette dose, on peut en déduire que la somme de l'azote présent dans le sol et de l'azote épandu répondait non

Figure 10

Effet de la fertilisation azotée sur a) le rendement de chou-fleur et le prélèvement d'azote et b) le contenu en azote minéral du sol après la récolte



seulement aux besoins en azote assimilable, mais assurait également la marge de sécurité. Tout autre épandage d'engrais n'aurait servi qu'à faire augmenter dans le sol l'azote résiduel susceptible d'être lessivé. Tout autre apport d'engrais destiné à accroître la marge de sécurité n'aurait été ni efficace, ni rationnel, ni respectueux de l'environnement.

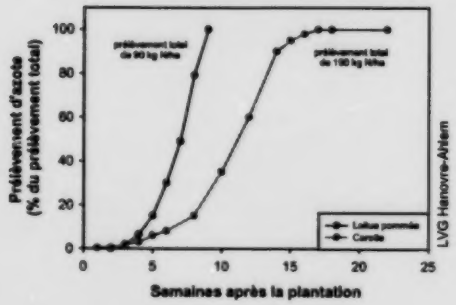
Pour empêcher le lessivage de l'azote après la récolte et la contamination éventuelle des eaux souterraines, on peut cultiver une autre espèce de couverture qui prélèvera dans le sol l'azote de la marge de sécurité, comme des radis ou de la moutarde, qui sont d'excellents récupérateurs d'azote.[27]

Tableau 6 : Relation entre la texture du sol, la capacité au champ et le risque de lessivage de nitrate

Texture du sol	Capacité au champ (mm d'eau par m de profondeur du sol)	Risque de lessivage du nitrate
Sable	135	Élevé
Sable loameux	210	
Loam sablonneux	245	
Loam	360	
Loam limoneux	330	
Argile	400	Faible

Figure 9

Prélèvement d'azote par deux cultures légumières



L'absorption d'azote par une plante, ou sa teneur en azote, est la quantité d'azote présente dans la biomasse fraîche. Elle est surtout sous forme organique et comprend l'azote du système racinaire, qui correspond à environ 10 % du poids de la portion aérienne de la plante (un pourcentage plus élevé dans le cas des légumes-racines et des tubercules). Le tableau 4 présente l'absorption totale d'azote de diverses cultures légumières. Si le rendement diffère considérablement de ces valeurs moyennes, un coefficient peut permettre de rajuster la teneur en azote.

Marge de sécurité

Même si la teneur en azote d'une plante représente une certaine partie de l'azote nécessaire à la production de biomasse, elle ne reflète pas entièrement les « besoins » généraux en azote de la plante. En fait, pour que sa croissance soit optimale, la plante a besoin d'une quantité additionnelle d'azote dans le sol, même si elle peut ne jamais l'assimiler. Cette quantité additionnelle est désignée par l'expression « marge de sécurité ».

La marge de sécurité d'une culture est définie, de manière empirique, comme étant la quantité d'azote minéral présente dans le sol au moment de la récolte, lorsqu'un rendement optimal est atteint. Selon les résultats d'études, la marge de sécurité est plus ou moins constante, et la réduire entraîne une diminution des rendements, malgré la présence permanente d'une quantité suffisante d'azote dans le sol pour combler les besoins de la culture et lui permettre d'atteindre un rendement maximal. Par conséquent, la marge de sécurité est nécessaire à un rendement optimal, mais elle n'est pas absorbée.

L'un des rôles de cette dernière est d'empêcher toute carence en azote si jamais le sol ne contenait que la quantité d'azote nécessaire à l'absorption. Dans un tel cas, des

Table 4: Approximate nitrogen uptake per tonne of yield of common vegetable crops, and the nitrogen uptake for a crop of average yield

Crop	Approximate nitrogen uptake per tonne of yield (kg N/ha)	Average yield (t/ha)	Nitrogen uptake for average yield (kg N/ha)
Beans, bush	8	12	100
Beets	5	50	250
Broccoli	13	20	260
Brussels sprouts	16	25	400
Cabbage, Chinese	3.5	70	250
Cabbage, white (early)	4	40	160
Cabbage, white (late)	3.5	80	280
Carrots	2.5	60	160
Cauliflower	7.5	35	260
Celery	4	50	200
Corn salad	4	15	60
Endive	3	40	120
Kale	5	30	150
Kohlrabi	4.5	40	180
Leeks	3.5	40	140
Lettuce, Boston	2.5	40	100
Onions	2.5	60	150
Peas	30	4	120
Radishes	3.2	25	80
Spinach	5	25	120

Scharpf, 1991

16

précipitations excessives pourraient lessiver une certaine quantité de cet azote et provoquer une carence. Outre la protection qu'elle assure, la marge de sécurité permet également à la plante de prélever dans le sol la totalité de la proportion d'azote nécessaire. En deçà d'une teneur critique du sol en azote, représentée par la marge de sécurité (tableau 5), l'efficacité d'une plante à prélever l'azote du sol est réduite. Les cultures à racines petites, superficielles et dotées de peu de poils absorbants (poireaux et oignons) ont de la difficulté à prélever l'azote dans le sol de sorte qu'il faut leur assurer une marge de sécurité relativement importante. À l'inverse, les plantes à systèmes racinaires longs, profonds et étendus et à longue durée de végétation n'ont besoin que d'une marge de sécurité restreinte.

Table 5: Safety margin of nitrogen required for some vegetable crops

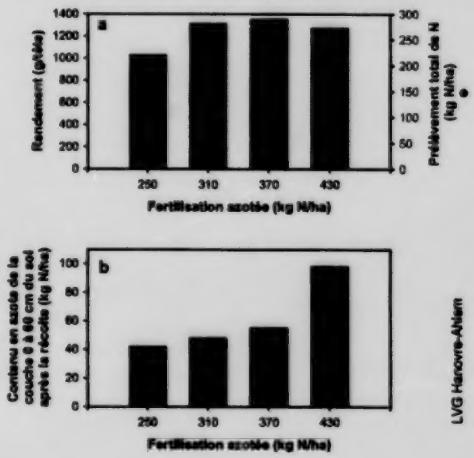
Mineral nitrogen required in rooted soil layer until harvest (Safety margin)		
< 30 kg N/ha	30 to 60 kg N/ha	60-90 kg N/ha
Brussels sprouts	Beans	Broccoli, early
Cabbage, late	Beets	Cauliflower
Carrots, late	Broccoli, late	Leek
	Cabbage, Chinese	Onion
	Cabbage, early	Spinach
	Carrots, early	
	Celery	
	Endive	
	Kale, curly	
	Kohlrabi	
	Lettuce, head	
	Lettuce, iceberg	
	Radicchio	
	Radish	

Adapted from Scharpf, 1991

Il faut que la marge de sécurité demeure la plus basse possible, tout en assurant une croissance maximale. Dans le cadre d'une étude, une culture de chou-fleur a continué de réagir positivement à des apports d'azote jusqu'à ce que 370 kg N /ha aient été épandus (figure 10). Puisque le rendement n'a pas augmenté au-delà de cette dose, on peut en déduire que la somme de l'azote présent dans le sol et de l'azote épandu répondait non

Figure 10

Effet de la fertilisation azotée sur a) le rendement de chou-fleur et le prélèvement d'azote et b) le contenu en azote minéral du sol après la récolte



seulement aux besoins en azote assimilable, mais assurait également la marge de sécurité. Tout autre épandage d'engrais n'aurait servi qu'à faire augmenter dans le sol l'azote résiduel susceptible d'être lessivé. Tout autre apport d'engrais destiné à accroître la marge de sécurité n'aurait été ni efficace, ni rationnel, ni respectueux de l'environnement.

Pour empêcher le lessivage de l'azote après la récolte et la contamination éventuelle des eaux souterraines, on peut cultiver une autre espèce de couverture qui prélèvera dans le sol l'azote de la marge de sécurité, comme des radis ou de la moutarde, qui sont d'excellents récupérateurs d'azote.[27]

Tableau 6 : Relation entre la texture du sol, la capacité au champ et le risque de lessivage de nitrate

Texture du sol	Capacité au champ (mm d'eau par m de profondeur du sol)	Risque de lessivage du nitrate
Sable	135	Élevé
Sable loameux	210	
Loam sablonneux	245	
Loam	360	
Loam limoneux	330	
Argile	400	Faible

Figure 11

Déplacement de l'azote dans le sol pendant l'hiver

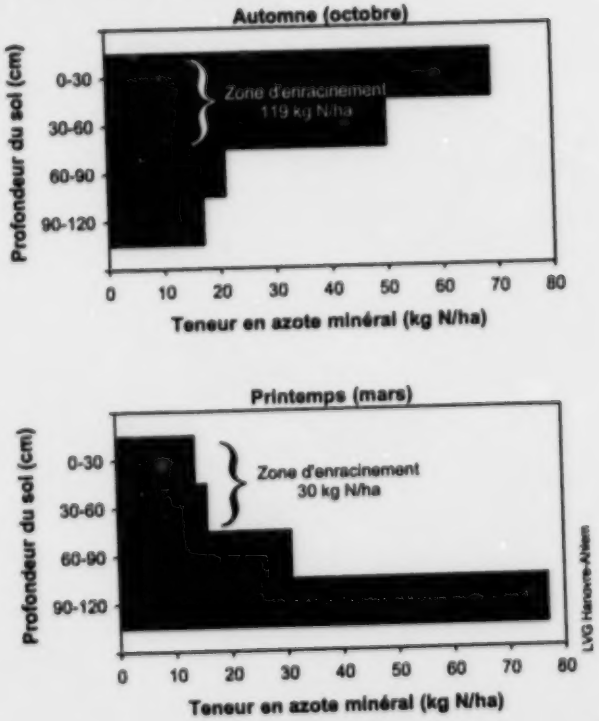


Figure 12 : Déplacement du nitrate dans le sol avec 30 mm de précipitation sur un sol saturé d'eau

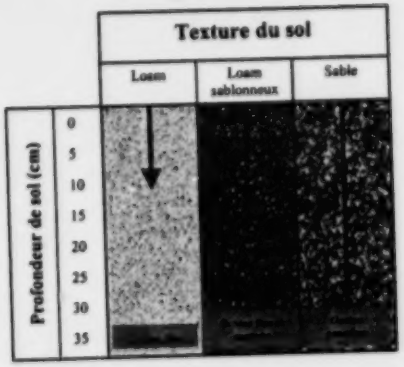
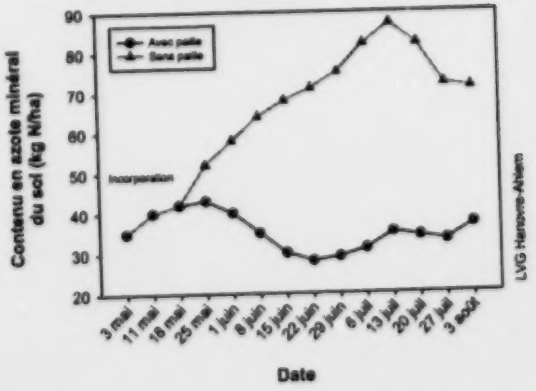


Figure 13

Effet de l'incorporation de paille hâchée (10 t/ha) sur la teneur en azote minéral du sol



2.2.2 Azote minéral non absorbé par la plante

Même dans les meilleures conditions, les végétaux ne sont capables d'absorber que de 60 à 80 % de l'azote contenu dans l'engrais épandu. Divers processus, soit le lessivage, la dénitrification, l'immobilisation, la fixation de l'ammonium et la volatilisation, rendent le reste inaccessible. Dans de nombreux systèmes culturaux, les pertes d'azote sont surtout dues au lessivage et à la dénitrification.[28] En fait, selon les estimations de l'U.S. Environmental Protection Agency, plus de 60 % des émissions totales d'ammoniac dans l'atmosphère aux États-Unis, soit plus de 500 millions de tonnes par année, seraient imputables aux engrais épandus.[24]

Lessivage

Le lessivage est un phénomène qui se produit principalement à l'automne et au printemps, lorsque les précipitations sont abondantes. Les nitrates sont solubles et complètement mobiles dans l'eau. Entraînés par les eaux d'infiltration, les nitrates se retrouvent au-delà de la rhizosphère et finissent par atteindre les eaux souterraines. Les pluies automnales et la fonte des neiges du début du printemps altèrent énormément la répartition de l'azote. Dans le cadre d'une étude, la teneur totale en azote minéral dans les 60 cm superficiels du sol, la zone du sol exploitée par la plupart des cultures légumières, était passée de 125 à 33 kg/ha au cours de l'hiver. L'azote s'était déplacé vers les couches plus profondes du sol (90-120 cm) où il était très sensible au lessivage et en grande partie hors de portée des racines des végétaux (figure 11). Le lessivage est relativement peu courant en été, car les précipitations sont faibles et les taux d'évapotranspiration sont élevés; l'eau s'évapore rapidement à la surface du sol ou elle est assimilée par les plantes et s'évapore par le feuillage. Le lessivage peut être important en été lorsque les pluies sont abondantes.

La quantité de nitrates lessivée dépend de quatre facteurs principaux : la quantité des précipitations/des eaux d'irrigation, la concentration de nitrates dans le sol, les propriétés du sol et la répartition des racines des végétaux. Les probabilités de lessivage augmentent avec la quantité des précipitations et la concentration de nitrates du sol. La capacité au champ est la quantité maximale d'eau qui peut demeurer dans le sol sans percoler. Une fois la capacité au champ atteinte, tout excès d'eau s'écoule vers le bas, entraînant les nitrates avec lui. La texture du sol est en relation avec la capacité au champ; des sols à texture grossière ont des pores de grande taille dans lesquels l'eau s'écoule facilement et ils ont donc une faible capacité au champ. Les sols à texture fine ont une plus grande capacité au champ. C'est pour cette raison que les sols légers (sableux) sont plus sensibles au lessivage des nitrates que les sols lourds (argileux) (figure 12, tableau 6).

La répartition des racines est également importante; le lessivage de l'azote appliqué à la volée risque d'être plus important entre les lignes dans le cas des cultures qui ont des systèmes racinaires peu étendus, incapables d'envoyer leurs racines dans l'interligne.[29]

Immobilisation

Les micro-organismes utilisent de l'azote pour dégrader la matière

organique. Si cette dernière ne contient pas suffisamment d'azote pour répondre à leurs besoins, ils absorbent l'azote minéral du sol. Cet azote est transformé en composés organiques à l'intérieur des micro-organismes et est non disponible pour la croissance des plantes. Cette transformation de l'azote minéral en azote organique s'appelle l'immobilisation.

L'immobilisation devient particulièrement intense lorsque le rapport carbone-azote (C/N) de la matière organique est supérieur à 30, signe que la quantité de carbone est très supérieure à celle de l'azote. La paille, la sciure de bois, d'autres matériaux ligneux et certains sous-produits industriels ont une teneur élevée en carbone et peuvent faire augmenter considérablement le rapport C/N lorsqu'ils sont incorporés au sol. Dans le cadre d'une étude, l'incorporation au sol de paille s'est traduite par une teneur en azote minéral plus faible que lorsqu'aucune paille n'était ajoutée; l'azote s'est plutôt trouvé immobilisé sous forme minérale (figure 13) L'immobilisation est souvent un phénomène temporaire. Les micro-organismes finissent par restituer l'azote au sol sous forme de déchets métaboliques et de cellules mortes. Dans certains cas, il faudra apporter une fertilisation azotée pour permettre aux micro-organismes de dégrader le carbone de la matière organique sans priver les végétaux d'azote lors du déroulement du processus.

L'immobilisation survient aussi lors de l'épandage d'engrais en surface, sans incorporation. Les micro-organismes qui entrent en action conservent cet azote pendant deux à cinq semaines avant de le restituer au sol sous forme d'azote minéral. Ce type d'immobilisation n'est pas bien compris, mais se produit par temps ensoleillé (engrais épandus à la surface du sol) plutôt que nuageux (engrais incorporés au sol). Il se pourrait que l'immobilisation ne puisse se produire parce que les micro-organismes ne peuvent s'activer en raison de l'assèchement de la surface du sol par le soleil. Sous cette croûte, le sol peut être encore très humide.

En règle générale, les micro-organismes immobilisent environ de 15 à 20 % de la quantité d'azote minéral incorporée au sol ou présente dans la couche superficielle du sol pendant une saison de croissance. Si la teneur en azote minéral du sol est très élevée, l'immobilisation peut prélever jusqu'à 40 % de la quantité d'azote théoriquement disponible pour les plantes.

Dénitrification

La plupart des bactéries ont besoin d'air ou d'oxygène pour s'activer, mais les bactéries dénitrifiantes sont capables de récupérer l'oxygène des nitrates (NO_3^-) du sol en l'absence de telles conditions. C'est ce processus qui transforme les nitrates du sol en gaz, soit en azote gazeux (N_2) et en oxyde nitreux (N_2O), lors de la dénitrification. La dénitrification se produit dans les sols pauvres en oxygène, comme les marais, les sols tourbeux et les sols mal drainés et est favorisé par des températures élevées (> 15°C).

Des facteurs comme le drainage, l'irrigation, les précipitations, la texture et la structure du sol, le compactage, la température et la fertilisation influent sur les taux de dénitrification. Selon les résultats d'un examen de nombreuses études sur la dénitrification, ce

Tableau 7 : Variation de taux de dénitrification et taux moyen de dénitrification dans des systèmes culturaux différents

Système cultural	Variation du taux de dénitrification (kg N/ha par année)	Taux moyen de dénitrification (kg N/ha par année)
Non-fertilisé, non-irrigué	0 à 17	3
Fertilisation azotée, non-irrigué	0 à 110	13
Fertilisation azotée, irrigué	49 à 239	113

Adapté de Barton et al., 1999

phénomène atteint son maximum dans les sols irrigués recevant une fertilisation azotée (tableau 7). En règle générale, de 10 à 30 % de l'azote minéral appliqué est sujet à la dénitrification.

Les pertes annuelles d'azote dues à la dénitrification sont estimées à 30-40 kg N par hectare dans des conditions de terrain normales. Elles peuvent atteindre de 100 à 200 kg N par hectare dans les conditions normales de production légumière.[25]

Nitrification

Les micro-organismes sont également les artisans de la nitrification. Ce processus en deux étapes débute par l'oxydation de l'ammoniac en nitrites et se termine par l'oxydation des nitrites en nitrates. La nitrification peut contribuer au lessivage si elle entraîne principalement la transformation de l'engrais ammoniacal en nitrates plutôt qu'en ammonium qui se lie aux particules argileuses du sol.

Fixation de l'ammonium (NH_4^+)

Les cultures peuvent être privées à court terme d'azote minéral par la fixation de l'ammonium. Ce processus dépend de la texture du sol; l'ammonium peut être emprisonné entre les feuillets d'argile, devenant inaccessible aux cultures et hors de portée des microbes capables de le transformer en nitrates. Cet ammonium peut devenir disponible plus tard au cours de la saison de croissance. L'impact sur l'agriculture demeure inconnu, mais ce processus pourrait bien être à l'origine de la moins grande disponibilité de l'ammonium que prévue lors de l'épandage d'engrais.

Volatilisation du NH_3

Le processus qui transforme l'ammonium (NH_4^+) en ammoniac (NH_3) s'appelle la volatilisation. S'il se produit à la surface du sol ou près de celle-ci, l'ammoniac, un composé gazeux, est relargué dans l'atmosphère et participe à l'effet de serre. L'ammonium se transforme rapidement en ammoniac dans certaines conditions, soit lorsque les températures du sol et de l'air sont élevées et que le temps est sec. Les possibilités que l'ammonium se transforme en ammoniac augmentent de façon exponentielle à mesure que le pH s'accroît, de sorte qu'il faudrait éviter les engrais ammoniacaux lorsque le pH du sol est supérieur à 7,0. [30]

Dans des conditions propices à la volatilisation, jusqu'à 50 % de l'azote appliqué peut être éliminé par ce processus. Pour être utilement entraîné dans le sol, l'ammonium doit se dissoudre rapidement dans l'eau du sol. Le meilleur moyen d'y arriver consiste à

Tableau 7 : Variation de taux de dénitrification et taux moyen de dénitrification dans des systèmes culturaux différents

Système cultural	Variation du taux de dénitrification (kg N/ha par année)	Taux moyen de dénitrification (kg N/ha par année)
Non-fertilisé, non-irrigué	0 à 17	3
Fertilisation azotée, non-irrigué	0 à 110	13
Fertilisation azotée, irrigué	49 à 239	113

Adapté de Barton et al., 1999

phénomène atteint son maximum dans les sols irrigués recevant une fertilisation azotée (tableau 7). En règle générale, de 10 à 30 % de l'azote minéral appliqué est sujet à la dénitrification.

Les pertes annuelles d'azote dues à la dénitrification sont estimées à 30-40 kg N par hectare dans des conditions de terrain normales. Elles peuvent atteindre de 100 à 200 kg N par hectare dans les conditions normales de production légumière.[25]

Nitrification

Les micro-organismes sont également les artisans de la nitrification. Ce processus en deux étapes débute par l'oxydation de l'ammoniac en nitrites et se termine par l'oxydation des nitrites en nitrates. La nitrification peut contribuer au lessivage si elle entraîne principalement la transformation de l'engrais ammoniacal en nitrates plutôt qu'en ammonium qui se lie aux particules argileuses du sol.

Fixation de l'ammonium (NH_4^+)

Les cultures peuvent être privées à court terme d'azote minéral par la fixation de l'ammonium. Ce processus dépend de la texture du sol; l'ammonium peut être emprisonné entre les feuillets d'argile, devenant inaccessible aux cultures et hors de portée des microbes capables de le transformer en nitrates. Cet ammonium peut devenir disponible plus tard au cours de la saison de croissance. L'impact sur l'agriculture demeure inconnu, mais ce processus pourrait bien être à l'origine de la moins grande disponibilité de l'ammonium que prévue lors de l'épandage d'engrais.

Volatilisation du NH_3

Le processus qui transforme l'ammonium (NH_4^+) en ammoniac (NH_3) s'appelle la volatilisation. S'il se produit à la surface du sol ou près de celle-ci, l'ammoniac, un composé gazeux, est relargué dans l'atmosphère et participe à l'effet de serre. L'ammonium se transforme rapidement en ammoniac dans certaines conditions, soit lorsque les températures du sol et de l'air sont élevées et que le temps est sec. Les possibilités que l'ammonium se transforme en ammoniac augmentent de façon exponentielle à mesure que le pH s'accroît, de sorte qu'il faudrait éviter les engrais ammoniacaux lorsque le pH du sol est supérieur à 7,0. [30]

Dans des conditions propices à la volatilisation, jusqu'à 50 % de l'azote appliqué peut être éliminé par ce processus. Pour être utilement entraîné dans le sol, l'ammonium doit se dissoudre rapidement dans l'eau du sol. Le meilleur moyen d'y arriver consiste à

incorporer l'ammonium dans un sol humide et frais. Si les conditions sont propices à la volatilisation, il faudra éviter d'épandre des engrais à teneur élevée en ammonium (urée, fumier).

Coûts de la volatilisation !!!

L'urée (46-0-0) est une source communément utilisée d'azote. Le coût de l'urée, par kg d'engrais, est comparable à celui du nitrate d'ammonium (34-0-0), soit environ 0,43 $. La teneur en azote de l'urée est toutefois 35 % plus élevée que celle du nitrate d'ammonium, de sorte que le coût par kg d'azote de l'urée est 35 % inférieur (environ 0,38 $).

Si une dose d'urée de 100 kg/ha était épandue en bandes latérales au milieu de la saison, par temps chaud, sec et venteux, les pertes d'azote par volatilisation pourraient peut-être atteindre 40 %. Le coût de l'épandage serait de 43 $/ha (100 kg x 0,43 $). Toutefois, la culture ne recevrait que 18,5 kg N/ha (46 kg/ha x 40 %) plutôt que 46 kg de N (46 % N sous forme d'urée x 100 kg), et les pertes directes d'azote par volatilisation dans l'atmosphère équivaudraient pour l'agriculteur à 11,20 $/ha (0,28 $ x 100 kg x 40 %).

Avec le nitrate d'ammonium, une substance plus résistante à la volatilisation, il faudrait une dose d'engrais de 135 kg/ha pour apporter 46 kg N/ha, ce qui correspond à un coût de 58 $/ha (135 kg/ha x 0,43 $). Par ailleurs, pour apporter seulement 18,5 kg N/ha avec un engrais à base de nitrate d'ammonium, il en coûterait 23,40 $/ha (18,5 kg x 100 / 34 x 0,43 $).

incorporer l'ammonium dans un sol humide et frais. Si les conditions sont propices à la volatilisation, il faudra éviter d'épandre des engrais à teneur élevée en ammonium (urée, fumier).

Coûts de la volatilisation !!!

L'urée (46-0-0) est une source communément utilisée d'azote. Le coût de l'urée, par kg d'engrais, est comparable à celui du nitrate d'ammonium (34-0-0), soit environ 0,43 $. La teneur en azote de l'urée est toutefois 35 % plus élevée que celle du nitrate d'ammonium, de sorte que le coût par kg d'azote de l'urée est 35 % inférieur (environ 0,38 $).

Si une dose d'urée de 100 kg/ha était épandue en bandes latérales au milieu de la saison, par temps chaud, sec et venteux, les pertes d'azote par volatilisation pourraient peut-être atteindre 40 %. Le coût de l'épandage serait de 43 $/ha (100 kg x 0,43 $). Toutefois, la culture ne recevrait que 18,5 kg N/ha (46 kg/ha x 40 %) plutôt que 46 kg de N (46 % N sous forme d'urée x 100 kg), et les pertes directes d'azote par volatilisation dans l'atmosphère équivaudraient pour l'agriculteur à 11,20 $/ha (0,28 $ x 100 kg x 40 %).

Avec le nitrate d'ammonium, une substance plus résistante à la volatilisation, il faudrait une dose d'engrais de 135 kg/ha pour apporter 46 kg N/ha, ce qui correspond à un coût de 58 $/ha (135 kg/ha x 0,43 $). Par ailleurs, pour apporter seulement 18,5 kg N/ha avec un engrais à base de nitrate d'ammonium, il en coûterait 23,40 $/ha (18,5 kg x 100 / 34 x 0,43 $).

3 Méthodes d'estimation des besoins en fertilisation azotée des cultures légumières

La quantité d'engrais azoté à épandre est principalement fonction de la différence entre la teneur en azote minéral du sol, combinée à la quantité qui devrait provenir de sources organiques pendant la saison, et les besoins en de la plante. Avant l'épandage d'engrais, il est important de mesurer ou d'estimer ces deux sources principales d'azote minéral dans le sol : l'azote déjà disponible au début de la saison (appelé azote minéral du sol ou AMS) et l'azote libéré par la minéralisation tout au long de la saison. Pour estimer les quantités d'azote, les producteurs maraîchers peuvent se fonder sur leur expérience et leurs observations, effectuer divers calculs ou mesurer directement les quantités en jeu à l'aide d'analyses du sol et des végétaux.

3.1 Méthodes fondées sur l'expérience et les observations

3.1.1 Expérience

Certains agriculteurs se fient énormément à leur expérience pour décider de la fertilisation azotée à apporter. Dans des cas extrêmes, ils sont persuadés qu'ils doivent continuer d'appliquer, bon an mal an, une dose très élevée d'azote sans tenir compte d'autres facteurs, puisque cette pratique leur a toujours procuré de bons rendements. Certains autres adoptent une approche légèrement différente et peuvent moduler les recommandations en fonction de l'état du sol, de la culture précédente et d'autres conditions. Dans le but d'obtenir une fertilisation efficace, il est judicieux de tenir compte des conditions et des caractéristiques de chaque champ ainsi que des variations interannuelles.

Recommandation unique

Plusieurs guides présentent des recommandations uniques à l'égard d'une même culture, sans tenir compte des condition du sol ou de l'historique du champ. Ainsi, au Québec, le *Conseil des Production Végétales du Québec* (CPVQ) et l'Association des fabricants d'engrais du Québec publient chacun leur propre guide à ce sujet. Au Royaume-Uni, le ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation (MAFF) formule le même type de recommandations, et nombre d'autres pays, États ou provinces préparent ou avalisent des guides comparables. En raison de la nature générale de ces guides, les agriculteurs peuvent mettre à profit leur propre expérience pour adapter les recommandations à l'aide de facteurs de correction.

Facteurs de correction

Il est possible de réduire la fertilisation azotée dans les cas suivants :

- Une quantité importante de résidus de culture a été laissée dans le champ l'automne précédent.
- L'hiver précédent a été doux et sec.
- Les semis sont tardifs.
- Des résidus de culture frais ou du fumier complet ont été épandus avant les semis.
- Un rendement inférieur à la moyenne est souhaité.

- Il faut limiter la teneur en nitrates de la portion comestible de la plante.
- Il faut améliorer la qualité nutritionnelle de la plante (teneur en sucre ou en vitamine C).
- Il faut améliorer la résistance aux maladies.
- Le feuillage de la plante ne constitue pas la portion commercialisable du légume.

Il est possible d'accroître la fertilisation azotée dans les cas suivants :

- Les précipitations ont été abondantes au cours de l'hiver précédent.
- Les précipitations ont été abondantes au cours du printemps.
- Les précipitation ont débuté tardivement au cours de la saison de croissance.
- Les semis sont hâtifs.
- Un rendement supérieur à la moyenne est souhaité.
- Le feuillage de la plante doit demeure en bonne santé (p. ex., les carottes).
- Une couleur vert foncé est souhaitable.

L'utilisation culturale de paillis n'a aucun effet particulier sur les besoins en azote et ne modifie pas les recommandations sur la quantité d'engrais azoté à appliquer.

3.1.2 Observations

Couleur du feuillage des cultures

Les agriculteurs au Québec jugent parfois de la nécessité d'apports d'azote par un simple examen visuel de la couleur du feuillage d'une culture. Si ce dernier semble pâle, ils apportent une plus grande quantité d'azote. Bien que cette pratique procure parfois l'effet souhaité, elle ne constitue pas une méthode efficace de fertilisation, et l'agriculteur risque fort d'apporter une trop grande quantité d'azote. Une variante de cette méthode a été appliquée à certaines cultures pour éliminer la composante « approximation » de cette démarche : elle consiste à comparer la couleur du feuillage d'une culture à un tableau de correspondance des couleurs élaboré spécialement pour une culture donnée dans une région particulière.

Figure 4

Parcelles non fertilisées

Un moyen d'évaluer les besoins en azote au fil des saisons est de comparer des plants fertilisés et non fertilisés. Des plants non fertilisés aussi verts et en apparence aussi en santé que des plants fertilisés sont un signe que le sol leur fournit suffisamment d'azote. Des plants non fertilisés plus pâles et plus petits que des plants fertilisés indiquent que les réserves azotées du sol sont faibles et qu'il faudrait probablement des épandages en bandes latérales de doses plus importantes d'engrais azoté.

Comment procéder :
Établir dans une petite section du champ une parcelle non fertilisée. Ne pas y épandre d'engrais azoté. Au moment des semis, n'appliquer que 40 % de la dose habituellement recommandée d'engrais

Figure 15

Gestion de la fertilisation azotée selon la méthode des fenêtres non-fertilisées

azoté. À la date prévue de l'épandage régulier en couverture ou en bandes latérales, comparer les plants de la parcelle témoin aux plants fertilisés. Si les plants de la parcelle ont une croissance (dimensions et couleur) semblable à ceux du reste du champ, n'appliquer ensuite que 10 % de la dose d'engrais recommandée à l'origine. La dose appliquée peut varier de 10 à 60 %, selon l'état comparé des plants du champ et de la parcelle témoin.

Pour établir une parcelle représentative de l'ensemble du champ, vous pouvez fermer l'épandeur d'engrais sur une distance d'environ 25 m, ce qui vous permettra de créer une parcelle d'une longueur de 25 m et de la largeur de la bande d'épandage. Jalonner la parcelle de manière à pouvoir la repérer avec précision pendant la saison de végétation. Il peut être difficile de s'assurer que la parcelle ne reçoit aucun engrais azoté lorsque l'épandage se fait à la volée plutôt qu'en bandes. Lors de la plupart des épandages à la volée, une certaine quantité d'engrais déborde de la zone traitée, ce qui aura pour effet de perturber la parcelle. Dans de tels cas, la méthode des parcelles non fertilisées peut s'avérer peu pratique.

Plantes indicatrices

Vous pouvez faire appel à cette même méthode et établir de petites parcelles dans une culture principale pour y cultiver des « plantes indicatrices ». Ces dernières ont généralement une croissance rapide, un enracinement profond et une grande capacité de prélèvement des éléments nutritifs dans le sol (p. ex., radis oléifères). La plante indicatrice est cultivé dans une petite section du champ ne recevant aucune fertilisation azotée, et ses caractéristiques de croissance servent à estimer la teneur en azote du sol. Trois semaines après les semis, la teneur en azote des 30 cm supérieurs du sol peut être estimée à partir des symptômes de carence de la plante. Elle peut être évaluée jusqu'à une profondeur de 60 cm après cinq semaines et jusqu'à une profondeur de 90 cm, après sept semaines.

Avec un peu de pratique, vous pourrez utiliser cette méthode pour obtenir une indication assez précise de la quantité d'azote minéral disponible dans le sol. Une variante de cette méthode consiste à fertiliser certaines des plantes indicatrices, ce qui vous permettra d'établir une comparaison entre des plants d'une même culture et de mieux estimer la teneur en azote du sol.

3.2 Méthodes fondées sur des calculs

Pour obtenir des estimations plus précises des besoins en azote, un producteur ou un agronome peut utiliser différents outils, comme des tables, des systèmes experts ou des modèles de simulation pour effecteur ses calculs. Les tables présentent des recommandations fondés sur de solides recherches agronomiques. Les systèmes experts et les modèles de simulation sont des programmes informatiques qui estiment les besoins en engrais azoté à l'aide des paramètres du bilan azoté. La différence entre les systèmes experts et les modèles de simulation réside principalement dans le type d'utilisateur. Les premiers sont destinés aux producteurs et aux conseillers agricoles et les seconds, aux chercheurs.

3.2.1 Systèmes experts

Le calcul d'un bilan azoté à partir des chiffres figurant dans des tables peut s'avérer très fastidieux. Il faut établir un bilan individuel pour chaque champ, une démarche qui prendra d'autant plus de temps que le nombre de composantes sera élevé. En outre, les supermarchés de certaines régions ont adopté des normes qui prévoient un protocole normalisé de gestion de la fertilisation et qui exigent par conséquent la tenue d'un registre par les producteurs. Au Québec, un règlement exige que les agriculteurs tiennent à jour un registre d'épandage de toutes les matières fertilisantes appliquées. Des programmes informatiques ont été élaborés et sont commercialisés dans le but d'aider les producteurs à établir des recommandations de fertilisation efficaces et à tenir à jour des registres exacts tout en réduisant le temps consacré à la gestion des engrais. Ils offrent souvent une interface conviviale conçue tout particulièrement pour les producteurs et les conseillers agricoles. Ils recommandent généralement des quantités d'azote moindres que ce que les producteurs auraient autrement appliqué.[31] Nombre des progiciels élaborés pour estimer les besoins en engrais azoté constituent un investissement rentable.

La présente section décrit trois progiciels: soit le N-Expert II, le Conseil-Champs et le WELL-N.

N-Expert II

Le N-Expert II (Institut des cultures légumières et ornementales, Groβbeeren, Allemagne) est un programme informatique qui calcule des recommandations de fertilisation de cultures légumières pour chaque champ. Les calculs sont basés sur de simples modèles de croissance des végétaux et sur des modèles du sol qui exigent peu de données d'entrée. Ces caractéristiques, combinées à l'interface conviviale, le rendent accessible aux agriculteurs et aux conseillers. La recommandation de fertilisation azotée est calculée à la manière d'un bilan à partir de six composantes : absorption d'azote par la plante; teneur en azote minéral nécessaire lors de la récolte; pertes d'azote; teneur en azote du sol lors des semis; minéralisation de l'azote à partir de l'humus; et minéralisation de l'azote à partir des résidus de culture. L'utilisateur peut entrer des données propres au champ ou accepter des valeurs normalisées provenant d'une banque de données qui englobe toutes les cultures légumières importantes. Ces données sont tirées d'expériences menées un peu partout en Allemagne. Le logiciel N-Expert fournit également des recommandations sur la fertilisation en phosphore, en potassium, en calcium et en magnésium. Vous trouverez une version de démonstration (en allemand) sur le site Internet suivant : http://www.dainet.de/igz/n-expert/demo.htm.

Conseil-Champs, Agri-Champs

Agri-Gestion Laval commercialise deux programmes d'ordinateur pour calculer les recommandations azotées : Conseil-Champs, destiné aux conseillers agricoles, et Agri-Champs, une version légèrement simplifiée à l'intention des exploitants agricoles. Ces deux programmes visent à répondre aux besoins des agriculteurs et des professionnels de l'agriculture du Québec. Ils font appel à la méthode de bilan pour recommander le niveau de fertilisation azotée. Les résultats d'analyses du sol ainsi que de substances

comme la chaux, les boues et le compost sont entrées dans le programme, tandis que d'autres données, comme les résultats d'analyse du fumier, l'absorption par la culture et le rendement cultural, peuvent être saisies manuellement ou tirées de tables intégrées au programme. Pour calculer le bilan azoté, le programme tient compte de la minéralisation de la matière organique du sol et des reliquats d'azote des résidus de la récolte antérieure et des fumures de l'automne précédent. Même s'il ne fait aucune déduction pour le lessivage, il intègre, dans le cas du fumier, des indices de pertes d'azote basés sur le matériel d'épandage, le type de fumier et les pratiques d'incorporation. Il fournit également des recommandations sur les doses de phosphore et de potassium à apporter. Le programme n'est pas particulièrement convivial et comporte de sérieux inconvénients (par exemple, il est très difficile de formuler des recommandations à l'égard de multiples cycles culturaux au cours d'une même saison). Auparavant uniquement disponible en DOS, il devrait être disponible pour tourner en Windows pour la première fois en 2001.

WELL_N

Le WELL-N (1994), un progiciel élaboré par Horticulture Research International à Wellesbourne, en Angleterre, calcule les besoins en engrais azoté de la plupart des plantes cultivées au Royaume-Uni. Le programme peut servir à calculer la teneur en azote du sol ainsi que la quantité de nitrates sujette au lessivage de différents types d'engrais. Le programme utilise des données sur les conditions météorologiques, les sols et les cultures pour calculer la teneur en azote du sol ainsi que la quantité de nitrates sujette au lessivage pour différents types d'engrais.

Deux modèles complémentaires sont intégrés au progiciel WELL-N; le premier utilise des données compilées avant le début de la croissance de la culture, et le second exécute automatiquement des mises à jour lors de la saisie de données additionnelles au cours de la saison de croissance.[32] Même s'il s'agit de la deuxième version du logiciel, les estimations de la teneur en nitrates demeurent trop élevées, et il faudra y apporter d'autres ajustements.

3.2.2 Modèles de simulation

Les modèles de simulation sont le plus souvent utilisés en recherche. Ces modèles servent à étudier les interactions de l'azote. En fournissant à ces modèles de nombreux ensembles de données expérimentales, les chercheurs sont en mesure de déterminer quels paramètres sont plus ou moins importants dans les interactions de l'azote et quels facteurs peuvent être utilisés pour influer sur le bilan azoté.

Selon une étude, les modèles les plus efficaces pour prévoir les besoins en azote des légumes sont ceux qui intègrent des données sur les conditions météorologiques locales.[33] Les paramètres suivants sont souvent utilisés dans des modèles de simulation pour calculer le mouvement des nitrates dans le sol et le lessivage :

- Teneur en azote minéral du sol
- Répartition dans le profil du sol de l'azote minéral
- Matière organique (facilement décomposable, lentement décomposable)

- Capacité au champ à différentes profondeurs
- Évaporation (précipitations, vent, éclairement, humidité relative de l'air)
- Température quotidienne (air, sol)
- Vitesse de minéralisation
- Absorption d'azote par la plante
- Absorption d'eau par la plante.

N-Able est un exemple de modèle de simulation. (Vous pouvez trouver N-Able à l'adresse suivante : http://www.qpais.co.uk/nable/nitrogen.htm.)

3.3 Méthodes fondées sur des analyses du sol et de la plante

Les besoins en fertilisation azotée peuvent être cernés à l'aide des résultats d'analyses du sol et de la plante. Les méthodes N_{min} et KNS (Kulturebegleitende Nmin Sollwerte) sont toutes deux destinées à formuler des recommandations de fertilisation basées sur des mesures de la teneur en azote minéral du sol. D'autres méthodes, fondées sur des mesures de la chlorophylle et des analyses de la sève et de l'azote total, mesurent la teneur en azote dans les tissus des végétaux pour déterminer les besoins en fertilisation azotée.

Des chercheurs ont étudié l'utilisation d'analyses de la sève et du sol dans la gestion de la fertilisation azotée des cultures légumières. Même si tous semblent convenir que le rajustement des recommandations de fertilisation en fonction des résultats d'analyses de l'azote minéral dans le sol au printemps est une bonne pratique, ils sont plus divisés sur la meilleure méthode de surveillance du bilan de l'azote dans la culture à utiliser pendant la saison de croissance. Des chercheurs de Californie, qui étudiaient des cultures irriguées de laitue, ont découvert que des analyses des nitrates du sol préalables à un épandage en bandes latérales donnaient des résultats très supérieurs à des analyses des nitrates de la sève faites au même moment.[34] Pourtant, des producteurs de pommes de terre du Minnesota, établis dans des régions où le sol est propice au lessivage (sol sableux), ont diminué leurs coûts de fertilisation et ont réduit encore plus leurs pertes par lessivage en fertilisant leurs champs en fonction des résultats des analyses de la sève.[35] Selon les résultats d'une étude effectuée au Québec, les analyses de la sève semblent offrir un outil prometteur pour décider de la dose d'engrais azoté à apporter lors d'un épandage en bandes latérales sur une culture de brocoli.[36] Il se pourrait fort bien que les analyses de la sève puissent permettre de suivre de près certaines cultures, mais non pas d'autres où il n'y a pas une étroite corrélation entre la teneur en nitrates de la sève et l'apport d'azote. Dans ce dernier cas, il vaudrait donc mieux avoir recours à des analyses des nitrates du sol.

3.3.1 Sol

L'analyse de l'azote du sol n'est utile que lorsque l'échantillon est représentatif du champ à fertiliser. À cette fin, il faut suivre une méthode précise d'échantillonnage du sol.[21] En raison de la variabilité du sol, et notamment de sa teneur en azote, il est essentiel de prélever de nombreux sous-échantillons; ces derniers sont groupés selon leur profondeur de prélèvement et soigneusement mélangés dans des seaux d'où des échantillons représentatifs de l'ensemble du champ (à

une profondeur donnée) seront prélevés. La profondeur de prélèvement des échantillons de sol doit correspondre à la profondeur d'enracinement de la culture : 0-30 cm, 0-60 cm ou 0-90 cm (tableau 8). Les plantes exploitent l'azote minéral du sol présent à différentes profondeurs selon l'extension de leurs racines.

Tableau 8 : Profondeur typique d'enracinement de quelques cultures

Profondeur d'enracinement		
0 à 30 cm	**0 à 60 cm**	**0 à 90 cm**
Chou-rave	Brocoli	Asperges
Épinards	Céleri	Céréales
Laitue	Chou-fleur	Choux de Bruxelles
Laitue pommée	Chou, hâtif	Chou, tardif
Pois	Endive	Colza
Radis	Haricot	Maïs
	Poireau	
	Pomme de terre	

Scharpf, 1991

Des études ont montré que la qualité des résultats des analyses de sol est directement proportionnelle au soin apporté au prélèvement ainsi qu'à la conservation et à l'analyse des échantillons. Une fois prélevé, l'échantillon doit être refroidi rapidement afin d'empêcher toute modification de sa teneur en nitrates avant son analyse.[37] Pour être en mesure de comparer avec confiance les résultats des différents échantillonnages, il est également important d'utiliser systématiquement la même méthode pour déterminer la teneur en azote du sol de tous les échantillons.

3.3.2 Végétaux

La teneur en nitrates des végétaux, à l'instar de celle du sol, est loin d'être homogène, et il faudra donc utiliser de nombreux sous-échantillons pour constituer un seul échantillon. L'échantillonnage devra être aussi représentatif que possible. Un échantillon doit se composer de tissus prélevés chez une vingtaine de plants répartis dans l'ensemble du champ. Puisque l'azote est mobile dans les tissus végétaux et migre souvent des feuilles plus âgées aux plus jeunes, on choisit habituellement la dernière feuille déroulée. L'azote des échantillons de tissus végétaux peut être mesuré de différentes façons. Certains essais sont destructifs; pour analyser les nitrates de la sève et l'azote total, il faut détacher les feuilles des végétaux. Par ailleurs, le chlorophyllomètre permet de mesurer la teneur en azote des tissus chez des feuilles intactes en pleine croissance.

Analyses de la sève

Des analyses des nitrates de la sève peuvent servir à surveiller la teneur en azote des végétaux. Une fois absorbé par les racines, l'azote est transporté jusqu'aux feuilles où il est transformé et incorporé à la matière vivante. Même si une partie de cette transformation peut se produire dans les racines plutôt que dans les feuilles, la teneur en nitrates des organes aériens de la plante indique assez bien si l'alimentation azotée de la plante est adéquate. Elle est donc mesurée dans un organe représentatif de la plante afin de dépister toute carence. La sève des pétioles donne généralement une meilleure idée de la teneur en azote de la plante, car elle est plus sensible aux fluctuations de l'apport d'azote que la sève extraite du limbe.

Bandelettes et réflectomètre

On peut mesurer les nitrates à l'aide de bandelettes Merkoquant et d'un réflectomètre Nitrachek (la méthodologie est expliquée en détail à l'annexe II). Les bandelettes Merckoquant sont spécialement traitées

une profondeur donnée) seront prélevés. La profondeur de prélèvement des échantillons de sol doit correspondre à la profondeur d'enracinement de la culture : 0-30 cm, 0-60 cm ou 0-90 cm (tableau 8). Les plantes exploitent l'azote minéral du sol présent à différentes profondeurs selon l'extension de leurs racines.

Tableau 8 : Profondeur typique d'enracinement de quelques cultures

Profondeur d'enracinement		
0 à 30 cm	**0 à 60 cm**	**0 à 90 cm**
Chou-rave	Brocoli	Asperges
Épinards	Céleri	Céréales
Laitue	Chou-fleur	Choux de Bruxelles
Laitue pommée	Chou, hâtif	Chou, tardif
Pois	Endive	Colza
Radis	Haricot	Maïs
	Poireau	
	Pomme de terre	

Scharpf, 1991

Des études ont montré que la qualité des résultats des analyses de sol est directement proportionnelle au soin apporté au prélèvement ainsi qu'à la conservation et à l'analyse des échantillons. Une fois prélevé, l'échantillon doit être refroidi rapidement afin d'empêcher toute modification de sa teneur en nitrates avant son analyse.[37] Pour être en mesure de comparer avec confiance les résultats des différents échantillonnages, il est également important d'utiliser systématiquement la même méthode pour déterminer la teneur en azote du sol de tous les échantillons.

3.3.2 Végétaux

La teneur en nitrates des végétaux, à l'instar de celle du sol, est loin d'être homogène, et il faudra donc utiliser de nombreux sous-échantillons pour constituer un seul échantillon. L'échantillonnage devra être aussi représentatif que possible. Un échantillon doit se composer de tissus prélevés chez une vingtaine de plants répartis dans l'ensemble du champ. Puisque l'azote est mobile dans les tissus végétaux et migre souvent des feuilles plus âgées aux plus jeunes, on choisit habituellement la dernière feuille déroulée. L'azote des échantillons de tissus végétaux peut être mesuré de différentes façons. Certains essais sont destructifs; pour analyser les nitrates de la sève et l'azote total, il faut détacher les feuilles des végétaux. Par ailleurs, le chlorophyllomètre permet de mesurer la teneur en azote des tissus chez des feuilles intactes en pleine croissance.

Analyses de la sève

Des analyses des nitrates de la sève peuvent servir à surveiller la teneur en azote des végétaux. Une fois absorbé par les racines, l'azote est transporté jusqu'aux feuilles où il est transformé et incorporé à la matière vivante. Même si une partie de cette transformation peut se produire dans les racines plutôt que dans les feuilles, la teneur en nitrates des organes aériens de la plante indique assez bien si l'alimentation azotée de la plante est adéquate. Elle est donc mesurée dans un organe représentatif de la plante afin de dépister toute carence. La sève des pétioles donne généralement une meilleure idée de la teneur en azote de la plante, car elle est plus sensible aux fluctuations de l'apport d'azote que la sève extraite du limbe.

Bandelettes et réflectomètre

On peut mesurer les nitrates à l'aide de bandelettes Merkoquant et d'un réflectomètre Nitrachek (la méthodologie est expliquée en détail à l'annexe II). Les bandelettes Merckoquant sont spécialement traitées

pour réagir en présence de NO_3 et prendre une couleur dont l'intensité varie directement avec la teneur. Cet essai semble universellement reconnu, car il est économique, précis et facile d'emploi. Les essais rapides présentent une corrélation très étroite avec les analyses classiques en laboratoire[37] et constituent donc une très bonne solution de rechange. On peut évaluer la couleur de la bandelettes en la comparant visuellement à un tableau de correspondance des couleurs ou à l'aide d'un réflectomètre, un appareil mis au point pour éliminer la subjectivité humaine (qui entraîne une marge d'erreur de 10 à 30 %). Le réflectomètre Nitrachek, distribué au Québec par la Compagnie Geneq, est la méthode la plus couramment utilisée pour vérifier rapidement la teneur en nitrates.

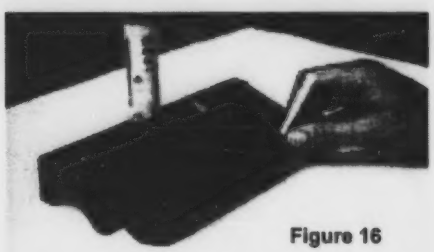


Figure 16

Électrodes à membrane sélective

Une autre méthode rapide pour vérifier la teneur en nitrates de la sève ou du sol fait appel à une électrode recouverte d'une membrane perméable à un ion particulier, dans le cas présent, à l'ion nitrate. Deux modèles sont actuellement commercialisés : l'*Horiba/Cardy meter* (Horiba Co., Japon), une électrode distribuée en Amérique du Nord par Spectrum Technologies (Plainfield, Illinois), ainsi qu'un appareil similaire produit par Hach Co. (Loveland, Connecticut). Les résultats obtenus à l'aide d'électrodes à membrane sélective sont étroitement corrélés à ceux obtenus en laboratoire.[38,39,40]

Mesures de la chlorophylle

Le SPAD, un appareil de mesure de la Minolta Corporation (Ramsey, New Jersey), réagit instantanément à la chlorophylle dans les feuilles. Pour détecter les différences de teneur en chlorophylle, l'appareil mesure la quantité de lumière passant à travers les feuilles et interprète les données concernant les propriétés de la chlorophylle et le spectre électromagnétique. Cette information peut servir à évaluer le niveau nutritionnel en azote de la plante.

L'appareil est précis, sensible, simple d'emploi et ne requiert ni produit chimique, ni préparation, ni échantillonnage destructif. La teneur en chlorophylle est habituellement étroitement corrélée à celle de l'azote, mais elle peut toutefois varier en fonction du cultivar, des conditions du milieu, du stade de croissance de la plante,[40] de la présence de maladies et d'organismes nuisibles et des températures froides.[41] C'est pourquoi les agriculteurs ne peuvent pas utiliser exclusivement le SPAD et doivent avoir recours à d'autres méthodes de suivi des cultures et des conditions

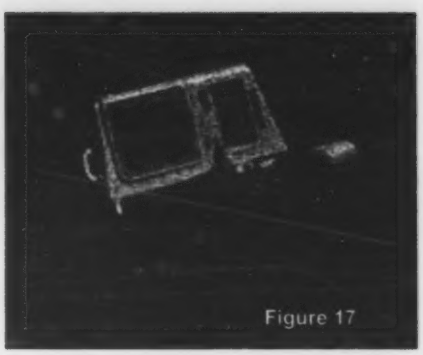


Figure 17

météorologiques. Certains effets de ces autres facteurs sur la teneur en chlorophylle peuvent ne pas affecter l'utilité des mesures pour la planification de la fertilisation si les valeurs de la chlorophylle obtenues dans le champ à fertiliser sont comparées à celles de plantes d'une bande expérimentale surfertilisée établie dans le même champ et exposée à l'influence de ces mêmes facteurs. Le SPAD est souvent considéré comme un investissement en raison de son coût relativement élevé.

Capteur N-Sensor et agriculture de précision

Le capteur N-Sensor, mis au point en Allemagne par la filiale de recherche agricole d'Hydro Agri International, est un dispositif qui permet de régler l'application d'azote à des doses variables. Il fonctionne en « temps réel », détecte les besoins en azote de la culture à partir de la lumière réfléchie par la culture et traduit immédiatement les données enregistrées en doses d'application. En pratique, le système est intégré au tracteur et à l'épandeur et prend ses mesures pendant les épandages en bandes latérales. À mesure que le dispositif détecte les besoins en azote, il ajuste en conséquence la dose d'application de l'épandeur.

Le capteur N-Sensor a été mis au point en Europe pour les menus grains et s'est avéré efficace; les cultures produites à l'aide de cette technologie ont eu des rendements en grains supérieurs et plus uniformes et présentaient une teneur plus élevée en protéines que celles produites sans son aide. Le N-Sensor a également permis de réduire la verse. De plus, il a permis une meilleure gestion de l'azote et a entraîné une diminution des risques de pollution.

Au Québec, la technologie du N-Sensor serait particulièrement utile aux agriculteurs lors de l'épandage en couverture d'engrais azotés dans les champs de maïs et de pommes de terre de semence. Des essais sont actuellement en cours au Québec afin d'adapter la technologie à ces cultures.

Analyse de l'azote total

Cette méthode consiste à déterminer la quantité totale de toutes les formes d'azote présentes dans les tissus des végétaux. À cette fin, les tissus sont séchés, finement broyés, digérés dans une solution acide et font ensuite l'objet d'analyses quantitatives.
L'échantillonnage des tissus doit être fait avec le plus grand soin, tout comme celui des sols. Chez les végétaux, l'azote total est corrélé à la fois à la quantité d'azote de la sève et à celle déjà incorporée dans des composés organiques, comme la chlorophylle, dans les tissus végétaux. L'analyse de l'azote total a peu d'utilité pour rajuster la fertilisation azotée à la mi-saison, car il peut s'écouler plusieurs jours, voire plusieurs semaines, avant de recevoir les résultats du laboratoire. Les agriculteurs ne peuvent effectuer eux-mêmes ce type d'analyse.

3.3.3 Utiliser les mesures de nitrate dans le sève et le sol

La non-comptabilisation de l'azote disponible dans le sol est une cause fréquente de surfertilisation. Pour obtenir une fertilisation efficace, il faut soustraire de la dose d'engrais recommandée la quantité d'azote disponible dans le sol. Il importe de souligner que la surveillance des nitrates de la sève fournit essentiellement les mêmes renseignements que l'analyse des

nitrates du sol. On peut corréler les nitrates de la sève à l'apport d'azote du sol et, par conséquent, on peut aussi rajuster les recommandations de fertilisation à la lumière des résultats d'analyse des nitrates de la sève, de la même façon qu'on peut réduire les applications d'engrais en fonction des résultats d'analyse des nitrates du sol.

Méthode N_{min}

La méthode N_{min}[42] (pour azote minéral), qui permet de formuler des recommandations de fertilisation azotée, inclut dans ses calculs une mesure réelle de la teneur en azote du sol. La teneur en azote minéral du sol est déterminée à partir d'un échantillon prélevé tôt en saison, avant les semis ou le repiquage. Cette quantité d'azote minéral du sol est ensuite soustraite d'une valeur cible de fertilisation azotée afin d'établir les recommandations finales d'azote à apporter. Puisqu'il a été démontré que la méthode N_{min} améliorait la gestion de l'azote, son emploi est particulièrement recommandé dans les régions de production légumière intensive (comme dans la région de Palatin, en Allemagne, ou en Montérégie, au Québec), dans les fermes détenant un certificat de production intégrée ainsi que dans les fermes situées près des sources d'approvisionnement en eau potable où les risques de pollution sont élevés. Malheureusement, le prélèvement et l'analyse des échantillons, étapes essentielles à l'utilisation fructueuse de la méthode N_{min}, ne sont pas toujours possibles. Les fermes peuvent être très éloignées d'un laboratoire, et les producteurs gèrent souvent de multiples cultures qui peuvent exiger des analyses individuelles et donc représenter un surcroît considérable de travail. La mise au point d'essais rapides des nitrates pourrait aider les agriculteurs à utiliser plus facilement la méthode N_{min}. L'annexe I présente une méthode complète d'essai rapide des nitrates du sol.

Si l'échantillonnage du sol et l'analyse des nitrates sont effectués avec soin et précision et si les valeurs cibles de la fertilisation azotée sont basées sur des essais menés dans des conditions locales, la méthode N_{min} procure des recommandations précises appropriées à chaque champ. Dans de telles conditions, la méthode N_{min} est plus exacte que les tables des valeurs moyennes ou des approximations. Les trois grands principes de la méthode N_{min} sont résumés ci-dessous.

Principes

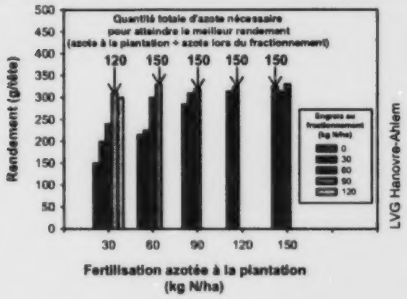
1- La profondeur de prélèvement des échantillons de sol doit correspondre à la profondeur d'enracinement de la culture

2- La teneur en azote du sol doit être quantifiée, car elle contribue concrètement aux besoins en azote de la culture. Plus la teneur en azote du sol est élevée, plus les apports azotés doivent être faibles (figure 18).

3- Pour chaque culture, il y a une teneur cible précise en azote pour atteindre un maximum de croissance et de rendement. La valeur cible est déterminée expérimentalement et est la somme de l'azote déjà disponible dans le sol et de l'azote apporté par l'épandage d'engrais. Dans le cas de la laitue (Table 9), il a été déterminé que la valeur cible variait de 130 à 150 kg N/ha.

Figure 18

Effet de différentes applications supplémentaires d'engrais azoté sur le rendement de la laitue pommée fertilisée avec cinq quantités d'azote à la plantation



La méthode N_{min} améliore la gestion des engrais, car elle fait mieux correspondre l'apport d'azote aux besoins de la culture. Son emploi est donc fortement recommandé dans les régions de production légumière intensive (comme dans la région du Palatinat, en Allemagne, ou en Montérégie, au Québec), notamment dans les fermes situées près des sources d'approvisionnement en eau potable où les risques de pollution sont élevés. Malheureusement, le prélèvement et l'analyse des échantillons ne sont pas toujours possibles. Les fermes peuvent être très éloignées d'un laboratoire, et les agriculteurs gèrent souvent de multiples cultures dont l'échantillonnage à des fins d'analyses individuelles peut entraîner un surcroît de travail. Une solution est toutefois en bonne voie d'élaboration! La mise au point d'essais rapides des nitrates pourrait aider les agriculteurs à utiliser plus facilement la méthode N_{min} (la méthodologie sont expliquées à l'annexe I).

Utilisation de l'approche de la « valeur cible »

La valeur cible de la méthode N_{min} représente la quantité totale d'azote qu'il faut apporter à une culture pour obtenir un rendement optimal. En fait, à moins

Tableau 9 : Valeurs cibles selon la méthode de fertilisation N_{min} pour quelques cultures légumières

Catégorie de valeur cible Nmin	Valeur cible	Culture
Très bas	80 à 100	Asperges Carotte Chicorée Pois
Bas	130 à 150	Haricot nain Haricot à rames Laitue Laitue pommée Radicchio
Moyen	160 à 200	Endive Chou-rave Oignon Radis Épinards
Élevé	220 à 250	Betterave Choux de Bruxelles Chou, hâtif Chou chinois Céleri Poireau Radis japonais Rhubarbe
Très élevé	300 à 350	Brocoli Chou, tardif Chou pour transformation Chou-fleur

Scharpf, 1991

d'avoir reçu des précipitations abondantes, le sol contient une quantité importante de nitrates, et la recommandation doit donc être inférieure à la valeur cible. Le dépassement de la valeur cible débouche inévitablement sur la surfertilisation et des risques accrûs de pollution de l'environnement.

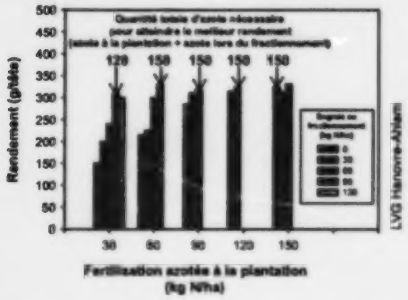
La méthode N_{min} tient certes compte de la minéralisation de l'humus au fil de la saison, mais non pas de l'incorporation de matière organique fraîche qui libère une quantité additionnelle d'azote. Les effets du milieu, les caractéristiques du sol et les pratiques culturales qui influent sur cette minéralisation varient considérablement d'une région à l'autre, de sorte qu'il faudra baser ces valeurs cibles sur des essais régionaux.

Modification de l'approche de la « valeur cible »

La méthode N_{min} ne tient pas compte de l'incorporation de matière organique fraîche qui libère une quantité

Figure 18

Effet de différentes applications supplémentaires d'engrais azoté sur le rendement de la laitue pommée fertilisée avec cinq quantités d'azote à la plantation



La méthode N_{min} améliore la gestion des engrais, car elle fait mieux correspondre l'apport d'azote aux besoins de la culture. Son emploi est donc fortement recommandé dans les régions de production légumière intensive (comme dans la région du Palatinat, en Allemagne, ou en Montérégie, au Québec), notamment dans les fermes situées près des sources d'approvisionnement en eau potable où les risques de pollution sont élevés. Malheureusement, le prélèvement et l'analyse des échantillons ne sont pas toujours possibles. Les fermes peuvent être très éloignées d'un laboratoire, et les agriculteurs gèrent souvent de multiples cultures dont l'échantillonnage à des fins d'analyses individuelles peut entraîner un surcroît de travail. Une solution est toutefois en bonne voie d'élaboration! La mise au point d'essais rapides des nitrates pourrait aider les agriculteurs à utiliser plus facilement la méthode N_{min} (la méthodologie sont expliquées à l'annexe I).

Utilisation de l'approche de la « valeur cible »

La valeur cible de la méthode N_{min} représente la quantité totale d'azote qu'il faut apporter à une culture pour obtenir un rendement optimal. En fait, à moins

Tableau 9 : Valeurs cibles selon la méthode de fertilisation N_{min} pour quelques cultures légumières

Catégorie de valeur cible Nmin	Valeur cible	Culture
Très bas	50 à 100	Asperges Carotte Chicorée Pois
Bas	130 à 150	Haricot nain Haricot à rames Laitue Laitue pommée Radicchio
Moyen	180 à 200	Endive Chou-rave Oignon Radis Épinards
Élevé	220 à 250	Betterave Choux de Bruxelles Chou, hâtif Chou chinois Céleri Poireau Radis japonais Rhubarbe
Très élevé	300 à 350	Brocoli Chou, tardif Chou pour transformation Chou-fleur

Scharpf, 1991

d'avoir reçu des précipitations abondantes, le sol contient une quantité importante de nitrates, et la recommandation doit donc être inférieure à la valeur cible. Le dépassement de la valeur cible débouche inévitablement sur la surfertilisation et des risques accrûs de pollution de l'environnement.

La méthode N_{min} tient certes compte de la minéralisation de l'humus au fil de la saison, mais non pas de l'incorporation de matière organique fraîche qui libère une quantité additionnelle d'azote. Les effets du milieu, les caractéristiques du sol et les pratiques culturales qui influent sur cette minéralisation varient considérablement d'une région à l'autre, de sorte qu'il faudra baser ces valeurs cibles sur des essais régionaux.

Modification de l'approche de la « valeur cible »

La méthode N_{min} ne tient pas compte de l'incorporation de matière organique fraîche qui libère une quantité

additionnelle d'azote au cours de la saison. Cet aspect a peu d'importance si une culture est planté dans un champ où aucune matière fraîche n'a été incorporée avant la plantation ou au moment de celle-ci. Si des quantités massives de matière organique facilement décomposable sont épandues au moment des semis ou du repiquage, il s'ensuivra une libération importante d'azote, et il devrait exister un moyen de tenir compte de cet azote lors de l'établissement de la dose d'engrais à appliquer. Pour y arriver, il faut modifier la méthode N_{min}. C'est ce que permet la méthode KNS.

Méthode KNS

La méthode N_{min} est utilisée pour déterminer la dose de fertilisation azotée à apporter, tandis que la méthode KNS[43] fait appel à des principes similaires pour décider de la proportion de la quantité recommandée d'azote à appliquer lors des semis et lors des épandages en couverture ou en bandes latérales effectués pendant la saison de croissance. Plutôt que de se servir d'une valeur cible unique, la méthode KNS en utilise des différentes tout au long de la saison. Elle permet d'effectuer d'autres épandages d'azote en se basant sur des valeurs cibles liées à des dates particulières et sur les résultats d'analyses de la teneur en azote minéral du sol effectuées avant les épandages en couverture ou en bandes latérales.

La méthode KNS offre les avantages suivants : l'échantillonnage peut être flexible (en termes de dates); la collecte de données peut être étalée sur toute la saison, un avantage pour les laboratoires qui ont souvent beaucoup de travail au cours de la période précédant les semis ou le repiquage; la méthode permet d'obtenir de l'information sur la minéralisation (vitesse, quantité). Toutefois, la vitesse de libération de l'azote fera que l'azote minéral présent dans la matière organique fraîche pourra ou non être détecté. On devrait attendre au moins quatre semaines après la fertilisation avant de prélever des échantillons de sol et, dans la mesure du possible, mettre de côté une parcelle où aucun azote ne sera épandu. On peut prélever des échantillons de sol dans cette parcelle non fertilisée et comparer ensuite les résultats d'analyse à ceux des échantillons provenant du reste du champ.

4 Bilan azoté

Le concept de bilan azoté est un concept important. Il considère les diverses interactions se produisant au cours du cycle de l'azote comme des entrées ou des sorties dans un système de culture. La différence entre les entrées et les sorties donne la quantité d'azote à apporter pour obtenir une fertilisation efficace. Cette approche calquée sur un bilan est à la base de nombreux programmes d'ordinateur conçus pour formuler des recommandations de fertilisation azotée, mais le bilan peut aussi être facilement calculé à la main à l'aide de valeurs données dans des tables. Puisqu'il tient compte des entrées et des sorties importantes d'azote, l'utilisation d'un bilan azoté pour calculer les recommandations de fertilisation azotée est probablement le meilleur moyen de fertiliser efficacement les cultures légumières. Cette approche est conçue expressément pour permettre l'application uniquement des doses d'éléments fertilisants nécessaires pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité de la culture.

4.1 Utilisation du bilan azoté lors de la fertilisation

Il est très important de se rappeler que les entrées et les sorties d'azote figurant au bilan n'ajoutent ni ne retranchent une même quantité d'azote minéral dans le sol (figure 19). La contribution propre à chaque composante du bilan azoté dépend de son rôle et de son importance relative. Il faut toujours tenir compte de certaines entrées : l'azote résiduel (azote disponible dans le sol au printemps) et l'azote provenant de la minéralisation. Le calcul doit parfois tenir compte de la quantité d'azote apportée par les eaux d'irrigation, mais il est généralement inutile d'inclure l'azote provenant des précipitations (tableau 10).

De la même manière, il est indispensable de tenir compte de certaines sorties dans le calcul du bilan azoté : la quantité d'azote absorbée par la culture, la marge de sécurité (considérée comme une sortie parce qu'elle reste après la récolte) et l'azote qui n'est pas disponible en raison de l'immobilisation. Le calcul doit parfois tenir compte de la quantité de nitrates lessivée, une étape qui n'est toutefois pas essentielle si les précipitations sont négligeables. La dénitrification n'a pas besoin d'être calculée, car elle est souvent égale aux entrées découlant des précipitations (tableau 10).

4.1.1 D'où viennent les valeurs?

Différentes méthodes ont été mises au point pour estimer ou mesurer les valeurs permettant de calculer le bilan azoté (section 2). Si la chose est possible, les mesures sont souvent préférables aux estimations qui introduisent une certaine marge d'erreur que la prise de mesures permet d'éviter. L'une des méthodes les plus courantes, que nous utiliserons dans les exemples suivants, consiste à utiliser des tables de valeurs empiriques. Puisque les conditions de croissance varient énormément d'une région à l'autre, il vaut mieux utiliser des tables élaborées à l'échelle locale.

Azote minéral du sol au printemps ou entre deux cultures

Les teneurs en azote du sol peuvent être estimées à deux époques : au printemps et entre deux cycles de cultures (dans les régions où les producteurs plantent plus

Figure 19
Importance des entrées et sorties dans le calcul d'un bilan azoté

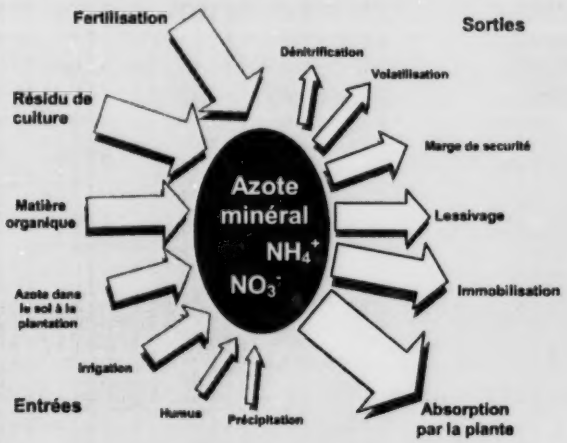


Tableau 10 : Importance relative des entrées et sorties d'azote relatif dans le calcul d'un bilan azoté

Niveau de priorité	Entrées	Sorties
Toujours tenu en compte	• Résidus culturaux • Minéralisation de la matière organique dans le sol • Azote dans le sol au printemps	• Prélèvement par la culture • Marge de sécurité • Immobilisation
Parfois tenu en compte	• Irrigation	• Lessivage
Rarement tenu en compte	• Précipitation	• Dénitrification

Tableau 11 : Exemple d'un tableau pour estimer le taux d'azote au printemps dans les premiers 60 cm du sol. Ce tableau en particulier est adapté aux hivers doux et non aux hivers rigoureux du Québec.

	Sable		Sable Loameux		Loam	
Quantité de N provenant de résidus de la culture précédente	Faible[1]	Grande[2]	Faible	Grande	Faible	Grande
Précipitation de novembre à mars	Estimation du taux d'azote minéral dans le sol au printemps (kg N/ha)					
100 mm	30	50	80	150	130	200
200 mm	20	30	30	100	80	150
300 mm	20	20	20	50	30	10

[1]e.g.; laitue—libère environ 30 kg N/ha

[2]e.g.; chou—libère environ 100 kg N/ha

Adapté de : Scharpf, 1991

d'une culture par année). Des facteurs différents sont pris en compte dans chaque cas.

Lorsque l'on désire déduire le contenu en azote minéral du sol au printemps sans le mesurer, les facteurs suivants doivent être considérés : le contenu en azote minéral à l'automne, le potentiel de minéralisation et de nitrification des résidus de la culture précédente au cours de l'hiver, de même que la dénitrification et le potentiel de lessivage au cours du dégel (figure 4).

Les tables, comme celle du tableau 11, peuvent servir à estimer la quantité d'azote présente au printemps. Ainsi, l'azote résiduel dans un sol sableux (sensible au lessivage) ayant reçu des précipitations hivernales moyennes à abondantes est estimé à 20 kg/ha. À l'inverse, l'azote résiduel est estimé à 200 kg/ha dans un loam où des résidus culturaux de chou ont été incorporés et qui a reçu des précipitations hivernales faibles. Puisque tant de facteurs sont en cause dans les transferts d'azote au cours de l'hiver et que les interactions reposent sur plusieurs facteurs climatiques, d'importantes recherches sont nécessaires pour établir des repères utiles aux fins de l'estimation des quantités d'azote minéral dans le sol au printemps. De telles données ne sont pas encore disponibles dans le cas des régions maraîchères où sévissent des hivers rigoureux avec des accumulations de neige dépassant les 350 mm, comme c'est le cas au Québec. Pour le moment, l'idéal est de mesurer le contenu en azote du sol au moyen d'un test rapide du nitrate. Le résultat de ce test peut être inclus dans les calculs de bilan azote comme celui du tableau 13.

Deux autres sources doivent être prises en considération lorsqu'il est nécessaire d'estimer l'azote impliqué dans une rotation prévoyant deux cultures pendant la même saison : la quantité d'azote minéral disponible dans le sol après la première récolte (la marge de sécurité ; tableau 4) et la quantité d'azote facilement minéralisable provenant des résidus de cette première culture (tableau 3). Ces deux sources peuvent être considérées dans le calcul du bilan azoté comme c'est le cas au tableau 14. À l'exception des cas de pluies abondantes sur des sols légers, ou dans le cas de cultures à l'enracinement très superficiel, l'effet des précipitations estivales sur le contenu en azote du sol est négligeable.

Minéralisation d'humus

La quantité d'azote qui sera rendue disponible pendant le cours d'une saison de croissance peut être estimée au moyen d'un calcul simple. L'azote minéral produit par l'humus du sol est libéré à raison d'environ 5 kg N/ha par semaine. Il s'agit donc de multiplier 5 kg N/ha par le nombre de semaines prévus pour la culture.

Minéralisation de résidus de cultures

Lorsque les apports des résidus de la culture précédente ou d'engrais minéraux sont élevés, la minéralisation a tendance à dépasser l'immobilisation. Dans de tels cas, la minéralisation n'annule pas l'effet de l'immobilisation, et ces deux processus doivent être pris en compte individuellement.

Le tableau 3 présente des chiffres qui peuvent être utilisés tant en Europe qu'au Québec. Ces valeurs ont été produites en multipliant le nombre de tonnes de matière fraîche par 3 kg N/tonne m.f. ce qui constitue une moyenne de

concentration en azote. Toutefois, comme il faut s'attendre à ce que seulement 70% de l'azote contenu dans les résidus soit minéralisé au profit de la culture suivante au cours d'une même saison, les valeurs présentées au tableau 3 doivent être multipliées par 0.7 pour témoigner de l'apport en azote minéral des résidus. Au Québec, un ajustement supplémentaire doit être réalisé pour tenir compte des pertes d'azote provenant des résidus de cultures au cours de l'hiver et du printemps. On peut raisonnablement estimer à environ 25% de leur contenu en azote la quantité provenant des résidus qui sera rendue disponible au profit de la culture suivante, après l'hiver. Il faut donc multiplier par 0.25 la quantité en azote des résidus pour réaliser une évaluation convenable du potentiel de fourniture en azote des résidus dans ce cas.

L'azote du compost est surtout présent sous forme organique et n'est pas disponible à court terme pour la culture. Il ne faudrait inclure au bilan que l'azote minéral présent dans le compost. Il faut déterminer cette quantité d'azote à l'aide d'analyses en laboratoire, car elle trop difficile à estimer.

Pour mesurer la teneur en azote minéral du fumier complet et du lisier liquide, on peut avoir recours à des analyses en laboratoire ou utiliser les tables disponibles à l'échelle locale.

Absorption par la plante

La quantité d'azote minéral absorbée dépend de la culture et du rendement produit. Le tableau 4 contient des données sur l'absorption d'azote de différentes cultures selon leur rendement moyen. Si les rendements réels prévus diffèrent des chiffres indiqués, un ajustement proportionnel doit être prévu dans les calculs.

Marge de sécurité

Le tableau 5 présente un certain nombre de marges de sécurité qui varient considérablement d'une culture à l'autre.

Azote immobilisé ou non disponible

Quelque 15 à 20 % de l'azote minéral, qu'il soit incorporé au sol ou déjà présent dans la couche superficielle du sol, est immobilisé par des micro-organismes ou est non disponible pour les végétaux en raison de processus comme la fixation de l'ammonium.

Eaux d'irrigation

La quantité d'azote apportée par les eaux d'irrigation n'a pas à être inscrite au bilan azoté, à moins qu'elle ne dépasse le seuil de 30 à 40 kg d'azote par saison.

Conversion des nitrates en équivalent azote ...

Il faut diviser un apport de X mg/L de nitrates par 4,43 pour le convertir en équivalent azote (kg/ha). Ainsi, 100 mm d'eau d'irrigation à teneur en nitrates de 100 mg/L apporteraient 22,5 kg d'azote par hectare.

Lessivage

Au Québec, le lessivage des nitrates se produit surtout au début du printemps et en automne. Le bilan azoté rend compte des processus qui se déroulent tout au long de la saison de croissance, période pendant laquelle le lessivage est négligeable.

Précipitations et dénitrification

La dénitrification n'a pas besoin d'être calculée. Les cultures légumières sont habituellement bien drainées, et la

concentration en azote. Toutefois, comme il faut s'attendre à ce que seulement 70% de l'azote contenu dans les résidus soit minéralisé au profit de la culture suivante au cours d'une même saison, les valeurs présentées au tableau 3 doivent être multipliées par 0.7 pour témoigner de l'apport en azote minéral des résidus. Au Québec, un ajustement supplémentaire doit être réalisé pour tenir compte des pertes d'azote provenant des résidus de cultures au cours de l'hiver et du printemps. On peut raisonnablement estimer à environ 25% de leur contenu en azote la quantité provenant des résidus qui sera rendue disponible au profit de la culture suivante, après l'hiver. Il faut donc multiplier par 0.25 la quantité en azote des résidus pour réaliser une évaluation convenable du potentiel de fourniture en azote des résidus dans ce cas.

L'azote du compost est surtout présent sous forme organique et n'est pas disponible à court terme pour la culture. Il ne faudrait inclure au bilan que l'azote minéral présent dans le compost. Il faut déterminer cette quantité d'azote à l'aide d'analyses en laboratoire, car elle trop difficile à estimer.

Pour mesurer la teneur en azote minéral du fumier complet et du lisier liquide, on peut avoir recours à des analyses en laboratoire ou utiliser les tables disponibles à l'échelle locale.

Absorption par la plante

La quantité d'azote minéral absorbée dépend de la culture et du rendement produit. Le tableau 4 contient des données sur l'absorption d'azote de différentes cultures selon leur rendement moyen. Si les rendements réels prévus diffèrent des chiffres indiqués, un ajustement proportionnel doit être prévu dans les calculs.

Marge de sécurité

Le tableau 5 présente un certain nombre de marges de sécurité qui varient considérablement d'une culture à l'autre.

Azote immobilisé ou non disponible

Quelque 15 à 20 % de l'azote minéral, qu'il soit incorporé au sol ou déjà présent dans la couche superficielle du sol, est immobilisé par des micro-organismes ou est non disponible pour les végétaux en raison de processus comme la fixation de l'ammonium.

Eaux d'irrigation

La quantité d'azote apportée par les eaux d'irrigation n'a pas à être inscrite au bilan azoté, à moins qu'elle ne dépasse le seuil de 30 à 40 kg d'azote par saison.

Conversion des nitrates en équivalent azote ...

Il faut diviser un apport de X mg/L de nitrates par 4,43 pour le convertir en équivalent azote (kg/ha). Ainsi, 100 mm d'eau d'irrigation à teneur en nitrates de 100 mg/L apporteraient 22,5 kg d'azote par hectare.

Lessivage

Au Québec, le lessivage des nitrates se produit surtout au début du printemps et en automne. Le bilan azoté rend compte des processus qui se déroulent tout au long de la saison de croissance, période pendant laquelle le lessivage est négligeable.

Précipitations et dénitrification

La dénitrification n'a pas besoin d'être calculée. Les cultures légumières sont habituellement bien drainées, et la

dénitrification est souvent plus ou moins équivalente aux entrées découlant des précipitations.

4.1.2 Exemple de calcul

Les exemples suivants (tableaux 12, 13, 14) montrent comment utiliser les tables pour dresser un bilan de l'azote. Bien qu'elle comporte certains paramètres qui s'annulent souvent mutuellement, l'équation suivante peut servir à déterminer la dose d'engrais à appliquer :

Si la différence entre les sorties et les entrées est positive, la fertilisation n'est pas nécessaire, puisque le sol fournira suffisamment d'azote pour répondre aux besoins de la culture. Cependant, si le résultat est négatif, il faudra apporter une fertilisation azotée pour répondre aux besoins de la culture. La dose d'engrais nécessaire correspond à l'ordre de grandeur de la valeur négative.

La régie de la fertilisation azotée peut être faite de façon semblable dans le cas où deux cultures sont pratiquées la même saison. La marge de sécurité appliquée à la première culture restera disponible pour la cultures suivante. Bien que cette quantité de sécurité puisse être considérée comme réellement disponible pour la culture suivante, l'idéal est de s'assurer de sa présence en réalisant un test rapide du contenu en azote du sol. Le tableau 14 présente les besoins en azote d'une culture de carotte suivant une culture de laitue.

Pour la gestion de la fertilisation, l'utilisation du bilan azoté pour déterminer la quantité d'engrais à apporter constitue une grande amélioration par rapport aux guides généraux de fertilisation ou aux approximations, aux règles empiriques et aux observations imprécises. L'établissement de la teneur en nitrates du sol, de la teneur en azote des résidus de culture et d'autres valeurs à l'aide de mesures peut rendre le calcul du bilan azoté encore plus exact que l'utilisation de valeurs figurant dans les tables.

Tableau 12 : Exemples de deux bilans azotés. Dans les deux bilans, la culture en cours est le chou-fleur. Le premier bilan montre les calculs si la culture précédente était le chou-fleur. Le deuxième bilan montre les calculs si la culture précédente était la laitue.

Culture actuelle Chou-fleur	Référence dans le texte	Culture précédente Carotte	Culture précédente Laitue
Saison de croissance (semaines)		24	10
Entrées	2.1		
Azote minéral du sol au printemps—estimé à partir d'un tableau (kg N/ha)	2.1.1 4.1.1 Tableau 11	20*	20*
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70*0.25)	2.1.2 4.1.1 Tableau 3	10	5
Minéralisation (5 kg N/ha par semaines*semaines)	2.1.2 4.1.1	50	50
Entrées totales		80	75
Sorties	2.2		
Absorption (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 4	260	260
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 5	75	75
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité)*0.10) (kg N/ha)	2.2.2 4.1.1	50	50
Sorties totales		285	285
Bilan azoté (besoin d'engrais) **(entrées – sorties)**	4.1	-205	-210

*Petite quantité, 30 kg N/ha, sable loameux, 300 mm de précipitation

12 19

Tableau 13 : Exemple d'un bilan azoté considérant une valeur d'azote minérale du sol au printemps mesuré par un test rapide de nitrate

Culture actuelle **Carotte**	Référence dans le texte	Culture précédente **Chou-fleur**
Saison de croissance (semaines)		24
Entrées	2.1	
Azote minéral du sol au printemps mesuré par un test rapide de nitrate (kg/ha)	3.3.2 Annexe I	35
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70*0.25)	2.1.2 4.1.1 Tableau 3	18
Minéralisation (5 kg N/ha par semaine*semaine)	2.1.2 4.1.1	120
Entrées totales		173
Sorties	2.2	
Absorption (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 4	160
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 5	45
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité*0.15) (kg N/ha)	2.2.2 4.1.1	30
Sorties totales		235
Bilan azoté (besoin d'engrais) **(entrées—sorties)**	4.1	-62

Tableau 14 : Exemple d'un bilan azoté pour la deuxième culture d'une même saison

Culture actuelle **Carotte**	Référence dans le texte	Culture précédente **Laitue**
Saison de croissance (semaines)		24
Entrées	2.1	
Azote minéral du sol entre les deux cultures mesuré par un test rapide de nitrate (kg N/ha)	3.3.2 Annexe I	15
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70)	2.1.2 Tableau 2	5
Minéralisation (5 kg N/ha par semaine*semaine)	2.1.2	120
Entrées totales		140
Sorties	2.2	
Absorption par la culture (kg N/ha)	2.2.1 Table 2	160
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 Tableau 3	25
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité)*0.15) (kg N/ha)	2.2.2	28
Sorties totales		213
Bilan azoté (besoin d'engrais) **(entrées – sorties)**	4.1	-73

dénitrification est souvent plus ou moins équivalente aux entrées découlant des précipitations.

4.1.2 Exemple de calcul

Les exemples suivants (tableaux 12, 13, 14) montrent comment utiliser les tables pour dresser un bilan de l'azote. Bien qu'elle comporte certains paramètres qui s'annulent souvent mutuellement, l'équation suivante peut servir à déterminer la dose d'engrais à appliquer :

Si la différence entre les sorties et les entrées est positive, la fertilisation n'est pas nécessaire, puisque le sol fournira suffisamment d'azote pour répondre aux besoins de la culture. Cependant, si le résultat est négatif, il faudra apporter une fertilisation azotée pour répondre aux besoins de la culture. La dose d'engrais nécessaire correspond à l'ordre de grandeur de la valeur négative.

La régie de la fertilisation azotée peut être faite de façon semblable dans le cas où deux cultures sont pratiquées la même saison. La marge de sécurité appliquée à la première culture restera disponible pour la cultures suivante. Bien que cette quantité de sécurité puisse être considérée comme réellement disponible pour la culture suivante, l'idéal est de s'assurer de sa présence en réalisant un test rapide du contenu en azote du sol. Le tableau 14 présente les besoins en azote d'une culture de carotte suivant une culture de laitue.

Pour la gestion de la fertilisation, l'utilisation du bilan azoté pour déterminer la quantité d'engrais à apporter constitue une grande amélioration par rapport aux guides généraux de fertilisation ou aux approximations, aux règles empiriques et aux observations imprécises. L'établissement de la teneur en nitrates du sol, de la teneur en azote des résidus de culture et d'autres valeurs à l'aide de mesures peut rendre le calcul du bilan azoté encore plus exact que l'utilisation de valeurs figurant dans les tables.

Tableau 12 : Exemples de deux bilans azotés. Dans les deux bilans, la culture en cours est le chou-fleur. Le premier bilan montre les calculs si la culture précédente était le chou-fleur. Le deuxième bilan montre les calculs si la culture précédente était la laitue.

Culture actuelle Chou-fleur	Référence dans le texte	Culture précédente Carotte	Culture précédente Laitue
Saison de croissance (semaines)		24	10
Entrées	2.1		
Azote minéral du sol au printemps—estimé à partir d'un tableau (kg N/ha)	2.1.1 4.1.1 Tableau 11	20*	20*
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70*0.25)	2.1.2 4.1.1 Tableau 3	10	5
Minéralisation (5 kg N/ha par semaines*semaines)	2.1.2 4.1.1	50	50
Entrées totales		80	75
Sorties	2.2		
Absorption (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 4	260	260
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 5	75	75
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité)*0.15) (kg N/ha)	2.2.2 4.1.1	50	50
Sorties totales		285	285
Bilan azoté (besoin d'engrais) (entrées – sorties)	4.1	-205	-210

*Petite quantité, 30 kg N/ha, sable loameux, 300 mm de précipitation

Tableau 13 : Exemple d'un bilan azoté considérant une valeur d'azote minérale du sol au printemps mesuré par un test rapide de nitrate

Culture actuelle **Carotte**	Référence dans le texte	Culture précédente **Chou-fleur**
Saison de croissance (semaines)		24
Entrées	2.1	
Azote minéral du sol au printemps mesuré par un test rapide de nitrate (kg/ha)	3.3.2 Annexe I	35
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70*0.25)	2.1.2 4.1.1 Tableau 3	18
Minéralisation (5 kg N/ha par semaine*semaine)	2.1.2 4.1.1	120
Entrées totales		173
Sorties	2.2	
Absorption (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 4	160
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 4.1.1 Tableau 5	45
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité*0.15) (kg N/ha)	2.2.2 4.1.1	30
Sorties totales		235
Bilan azoté (besoin d'engrais) (entrées—sorties)	4.1	-62

Tableau 14 : Exemple d'un bilan azoté pour la deuxième culture d'une même saison

Culture actuelle **Carotte**	Référence dans le texte	Culture précédente **Laitue**
Saison de croissance (semaines)		24
Entrées	2.1	
Azote minéral du sol entre les deux cultures mesuré par un test rapide de nitrate (kg N/ha)	3.3.2 Annexe I	15
Résidus de la culture précédente (kg N/ha*0.70)	2.1.2 Tableau 2	5
Minéralisation (5 kg N/ha par semaine*semaine)	2.1.2	120
Entrées totales		140
Sorties	2.2	
Absorption par la culture (kg N/ha)	2.2.1 Table 2	160
Marge de sécurité (kg N/ha)	2.2.1 Tableau 3	25
Immobilisation ((absorption+marge de sécurité)*0.15) (kg N/ha)	2.2.2	28
Sorties totales		213
Bilan azoté (besoin d'engrais) (entrées – sorties)	4.1	-73

5 Prévention du lessivage de l'azote

Le lessivage (section 2.2.2) est l'entraînement vers le bas de substances du sol par les eaux d'infiltration et leur évacuation dans les eaux souterraines. Les nitrates sont des substances facilement lessivables qui sont largement utilisées comme engrais, et leur mauvaise gestion peut provoquer la pollution de l'eau. Au Canada, des concentrations d'azote sous forme de nitrates dans l'eau potable supérieures à 10 ppm sont jugées nocives pour la santé de l'homme.[44] Les nitrates peuvent être mortels pour les nourrissons, surtout ceux âgés de trois à six mois.[45] Une fois ingérés, les nitrates peuvent se transformer en nitrites toxiques dans le tube digestif du nourrisson, provoquant une déficience en oxygène appelée **méthémoglobinémie**. Dans la majorité des cas attribués à une contamination de l'eau potable, la concentration d'azote sous forme de nitrates dans l'eau dépassait 40 mg par litre, soit quatre fois la concentration maximale acceptable au Canada.[46] Les nitrates affectent la santé des écosystèmes tout comme celle de l'homme; de plus, la présence de nitrates et de phosphates dans les cours d'eau entraîne l'eutrophisation[41] qui transforme les lacs et les étangs en marais et finit par assécher complètement l'étendue d'eau.

Méthémoglobinémie (syndrome des bébés bleus)

La méthémoglobinémie (syndrome des bébés bleus) peut être mortelle, notamment chez les nourrissons et les enfants. La plupart des cas recensés étaient causés par des teneurs excessives en nitrates dans l'eau potable. Toutefois, il convient également de noter que l'incidence de la méthémoglobinémie a diminué brusquement au début des années 1950, à tel point que nombre d'organismes publics américains de déclaration des maladies, y compris le National Institute of Health et le National Center for Disease Control, ont arrêté de compiler des statistiques au sujet de cette maladie en raison de sa rareté (Council for Agricultural Science and Technology, 1992). Les cas de méthémoglobinémie ont diminué, tandis que l'emploi d'engrais a nettement augmenté.

Toutefois, la surfertilisation des cultures est une source importante de nitrates dans les eaux souterraines. Pour que l'incidence de la méthémoglobinémie continue d'être faible, tous les secteurs de l'agriculture doivent jouer un rôle dans la prévention de la pollution par les nitrates.

Au Québec, on a découvert des teneurs élevées en nitrates dans nombre de rivières et cours d'eau. Selon les résultats d'études portant sur les sources de pollution par les nitrates dans 15 bassins hydrographiques agricoles, la production de cultures commerciales, comme le maïs, est un facteur contribuant significatif tout comme les cultures légumières et la production de pommes de terre. Même si les cultures commerciales pratiquées dans ces régions occupent une plus grande superficie, une comparaison du bilan global de l'azote dans un bassin hydrographique a montré que les terres plantées de cultures légumières représentaient un risque beaucoup plus grand de lessivage des nitrates.

Pour tenter de réduire la pollution de l'eau par les nitrates, certains gouvernements (Suisse, Finlande, Autriche et Belgique) limitent la quantité maximale d'azote pouvant être apportée en une seule application, ou l'apport total en azote. L'azote qui est éliminé par le lessivage représente non seulement une préoccupation environnementale pour les agriculteurs, mais également un gaspillage financier. La réglementation qui se contente de limiter les apports d'azote n'encourage

Pollution par les nitrates au Québec

Les teneurs en nitrates dans les cours d'eau naturels sont souvent inférieures à 0,2 mg N/L, mais elles sont beaucoup plus élevées dans certains cours d'eau du Québec. Les cours d'eau traversant des terres agricoles ont des teneurs plus élevées que ceux qui coulent en forêt, une constatation qui a entraîné la réalisation de certaines études sur l'influence de l'agriculture sur la qualité de l'eau. Selon les résultats d'une étude effectuée dans 22 bassins hydrographiques agricoles du Québec, les principaux facteurs influant sur le flux des nitrates sont la densité des populations humaines, l'intensité de l'élevage et les cultures à grand interligne, comme le maïs, la pomme de terre et de nombreuses cultures légumières.[53] La production légumière n'est souvent pas considérée comme une source de nitrates, car elle occupe une superficie beaucoup plus petite que le maïs, souvent cité comme une culture fortement fertilisée qui entraîne l'érosion du sol et le lessivage. Toutefois, des chercheurs ont mené une étude dans le bassin hydrographique du ruisseau Norton, situé dans la région maraîchère de choix de la Montérégie, pour comparer les entrées et les sorties de cultures de maïs et de cultures légumières et sont arrivés à certains résultats révélateurs.[54] Les cultures légumières laissaient deux fois plus de nitrates dans le sol après la récolte que les cultures industrielles (tableau 15). Même si, en général, les teneurs en nitrates des cours d'eau du Québec demeurent toujours inférieures à 10 mg N/L, la norme pour la qualité de l'eau potable au Canada, il est clair qu'il faut prendre des mesures pour préserver la qualité de l'eau : l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais en agriculture est un bon endroit où commencer.

La réglementation concernant la réduction de la pollution agricole[19] fixe certaines limites à l'utilisation de l'azote. La teneur en azote du fumier ne peut dépasser les limites fixées pour chaque culture dans la réglementation, et la quantité d'engrais épandue doit se fonder sur les besoins de la plante et tenir compte de l'azote provenant de la minéralisation de la matière organique du sol ainsi que des résidus de culture.

Tableau 15 : Comparaison des bilans azotés globaux pour les grandes cultures et les cultures maraîchères dans le bassin versant Corbin au Québec

	Grandes cultures	Cultures maraîchères
Entrées d'azote	183	155
Sorties d'azote	132	35
Bilan	52	120

Adapté de Demarais et Breune, 1998

pas nécessairement les agriculteurs à moduler d'autres aspects de la gestion de la fertilisation afin de réduire le lessivage. S'ils comprennent les nombreux facteurs qui influent sur le lessivage, les agriculteurs découvriront de nombreuses façons de le réduire et ils économiseront ainsi de l'argent et préviendront la pollution.

5.1 Gestion améliorée des engrais

Le contrôle de la fertilisation azotée est le meilleur moyen de réduire le lessivage des nitrates. L'agriculteur a le pouvoir de décider de la dose d'engrais à utiliser et de la période et de la méthode d'épandage. Ces trois facteurs influent sur le risque de lessivage des nitrates dans un champ donné.

5.1.1 Dose d'engrais

Les agriculteurs utilisent souvent de fortes doses d'azote pour obtenir des rendements élevés. Cependant, des apports sans cesse croissants d'azote ne donnent pas des rendements toujours plus élevés. L'azote utilisé par les végétaux est régi par la loi des rendements décroissants; à mesure que les rendements augmentent, le gain net pour l'agriculteur diminue. Chaque kg additionnel d'azote appliqué coûte le même prix, mais l'augmentation de rendement devient de plus en plus petite. À un certain niveau, le coût d'un kg additionnel d'engrais n'engendre pas suffisamment de profit pour justifier son emploi.

De plus, le rendement d'une culture peut être limité par des facteurs sans rapport avec la disponibilité de l'engrais azoté.

5 Prévention du lessivage de l'azote

Le lessivage (section 2.2.2) est l'entraînement vers le bas de substances du sol par les eaux d'infiltration et leur évacuation dans les eaux souterraines. Les nitrates sont des substances facilement lessivables qui sont largement utilisées comme engrais, et leur mauvaise gestion peut provoquer la pollution de l'eau. Au Canada, des concentrations d'azote sous forme de nitrates dans l'eau potable supérieures à 10 ppm sont jugées nocives pour la santé de l'homme.[44] Les nitrates peuvent être mortels pour les nourrissons, surtout ceux âgés de trois à six mois.[45] Une fois ingérés, les nitrates peuvent se transformer en nitrites toxiques dans le tube digestif du nourrisson, provoquant une déficience en oxygène appelée **méthémoglobinémie**. Dans la majorité des cas attribués à une contamination de l'eau potable, la concentration d'azote sous forme de nitrates dans l'eau dépassait 40 mg par litre, soit quatre fois la concentration maximale acceptable au Canada.[46] Les nitrates affectent la santé des écosystèmes tout comme celle de l'homme; de plus, la présence de nitrates et de phosphates dans les cours d'eau entraîne l'eutrophisation[44] qui transforme les lacs et les étangs en marais et finit par assécher complètement l'étendue d'eau.

Méthémoglobinémie (syndrome des bébés bleus)

La méthémoglobinémie (syndrome des bébés bleus) peut être mortelle, notamment chez les nourrissons et les enfants. La plupart des cas recensés étaient causés par des teneurs excessives en nitrates dans l'eau potable. Toutefois, il convient également de noter que l'incidence de la méthémoglobinémie a diminué brusquement au début des années 1950, à tel point que nombre d'organismes publics américains de déclaration des maladies, y compris le National Institute of Health et le National Center for Disease Control, ont arrêté de compiler des statistiques au sujet de cette maladie en raison de sa rareté (Council for Agricultural Science and Technology, 1992). Les cas de méthémoglobinémie ont diminué, tandis que l'emploi d'engrais a nettement augmenté.

Toutefois, la surfertilisation des cultures est une source importante de nitrates dans les eaux souterraines. Pour que l'incidence de la méthémoglobinémie continue d'être faible, tous les secteurs de l'agriculture doivent jouer un rôle dans la prévention de la pollution par les nitrates.

Au Québec, on a découvert des teneurs élevées en nitrates dans nombre de rivières et cours d'eau. Selon les résultats d'études portant sur les sources de pollution par les nitrates dans 15 bassins hydrographiques agricoles, la production de cultures commerciales, comme le maïs, est un facteur contribuant significatif tout comme les cultures légumières et la production de pommes de terre. Même si les cultures commerciales pratiquées dans ces régions occupent une plus grande superficie, une comparaison du bilan global de l'azote dans un bassin hydrographique a montré que les terres plantées de cultures légumières représentaient un risque beaucoup plus grand de lessivage des nitrates.

Pour tenter de réduire la pollution de l'eau par les nitrates, certains gouvernements (Suisse, Finlande, Autriche et Belgique) limitent la quantité maximale d'azote pouvant être apportée en une seule application, ou l'apport total en azote. L'azote qui est éliminé par le lessivage représente non seulement une préoccupation environnementale pour les agriculteurs, mais également un gaspillage financier. La réglementation qui se contente de limiter les apports d'azote n'encourage

Pollution par les nitrates au Québec

Les teneurs en nitrates dans les cours d'eau naturels sont souvent inférieures à 0,2 mg N/L, mais elles sont beaucoup plus élevées dans certains cours d'eau du Québec. Les cours d'eau traversant des terres agricoles ont des teneurs plus élevées que ceux qui coulent en forêt, une constatation qui a entraîné la réalisation de certaines études sur l'influence de l'agriculture sur la qualité de l'eau. Selon les résultats d'une étude effectuée dans 22 bassins hydrographiques agricoles du Québec, les principaux facteurs influant sur le flux des nitrates sont la densité des populations humaines, l'intensité de l'élevage et les cultures à grand interligne, comme le maïs, la pomme de terre et de nombreuses cultures légumières.[53] La production légumière n'est souvent pas considérée comme une source de nitrates, car elle occupe une superficie beaucoup plus petite que le maïs, souvent cité comme une culture fortement fertilisée qui entraîne l'érosion du sol et le lessivage. Toutefois, des chercheurs ont mené une étude dans le bassin hydrographique du ruisseau Norton, situé dans la région maraîchère de choix de la Montérégie, pour comparer les entrées et les sorties de cultures de maïs et de cultures légumières et sont arrivés à certains résultats révélateurs.[54] Les cultures légumières laissaient deux fois plus de nitrates dans le sol après la récolte que les cultures industrielles (tableau 15). Même si, en général, les teneurs en nitrates des cours d'eau du Québec demeurent toujours inférieures à 10 mg N/L, la norme pour la qualité de l'eau potable au Canada, il est clair qu'il faut prendre des mesures pour préserver la qualité de l'eau : l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais en agriculture est un bon endroit où commencer.

La réglementation concernant la réduction de la pollution agricole[19] fixe certaines limites à l'utilisation de l'azote. La teneur en azote du fumier ne peut dépasser les limites fixées pour chaque culture dans la réglementation, et la quantité d'engrais épandue doit se fonder sur les besoins de la plante et tenir compte de l'azote provenant de la minéralisation de la matière organique du sol ainsi que des résidus de culture.

Tableau 15 : Comparaison des bilans azotés globaux pour les grandes cultures et les cultures maraîchères dans le bassin versant Corbin au Québec.

	Grandes cultures	Cultures maraîchères
Entrées d'azote	183	155
Sorties d'azote	132	35
Bilan	52	120

Adapté de : Demarais et Breune, 1998

pas nécessairement les agriculteurs à moduler d'autres aspects de la gestion de la fertilisation afin de réduire le lessivage. S'ils comprennent les nombreux facteurs qui influent sur le lessivage, les agriculteurs découvriront de nombreuses façons de le réduire et ils économiseront ainsi de l'argent et préviendront la pollution.

5.1 Gestion améliorée des engrais

Le contrôle de la fertilisation azotée est le meilleur moyen de réduire le lessivage des nitrates. L'agriculteur a le pouvoir de décider de la dose d'engrais à utiliser et de la période et de la méthode d'épandage. Ces trois facteurs influent sur le risque de lessivage des nitrates dans un champ donné.

5.1.1 Dose d'engrais

Les agriculteurs utilisent souvent de fortes doses d'azote pour obtenir des rendements élevés. Cependant, des apports sans cesse croissants d'azote ne donnent pas des rendements toujours plus élevés. L'azote utilisé par les végétaux est régi par la loi des rendements décroissants; à mesure que les rendements augmentent, le gain net pour l'agriculteur diminue. Chaque kg additionnel d'azote appliqué coûte le même prix, mais l'augmentation de rendement devient de plus en plus petite. À un certain niveau, le coût d'un kg additionnel d'engrais n'engendre pas suffisamment de profit pour justifier son emploi.

De plus, le rendement d'une culture peut être limité par des facteurs sans rapport avec la disponibilité de l'engrais azoté,

comme les unités thermiques ou les degrés-jours de croissance, la teneur en eau du sol et les caractéristiques génétiques du cultivar. Un autre élément nutritif peut avoir un effet limitant et empêcher la plante de croître et d'utiliser l'engrais azoté. L'augmentation des applications d'engrais au-delà de la dose optimale ne neutralisera pas les autres facteurs limitants.

Un moyen de savoir si un champ a été surfertilisé consiste à vérifier la teneur en azote du sol après la récolte. Le sol devrait toujours contenir la marge de sécurité, soit de 30 à 90 kg N/ha, selon le type de plante cultivée (tableau 5). Une teneur supérieure à 90 kg N/ha signifie que le champ a été surfertilisé.

5.1.2 Manipulation des engrais (où, quand, quel type)

Applications fractionnées

Pour empêcher le lessivage, il est préférable d'avoir recours à plusieurs applications (applications fractionnées) plutôt qu'à une seule.[47] Si tous les engrais sont épandus en même temps et que surviennent ensuite des précipitations abondantes, une quantité significative de nitrates se lessivera. Les applications fractionnées offrent un autre avantage tout aussi important : elles peuvent améliorer les rendements en faisant mieux coïncider l'apport en azote avec le développement de la culture.[48]

L'irrigation fertilisante ou fertirrigation, une technique qui consiste à ajouter l'engrais directement dans les eaux d'irrigation, est un moyen flexible et efficace d'effectuer des applications fractionnées d'engrais. Des gaines perforées disposées tout près de la base des plants transportent la solution fertilisante présente dans l'eau d'irrigation. L'arrosage est habituellement hebdomadaire, mais est parfois effectué chaque jour. Il faut faire preuve de vigilance lors de l'emploi de la fertirrigation, car les risques de lessivage augmentent proportionnellement au volume d'eau. Le fertirrigation constitue également un moyen prometteur pour réduire la variabilité de la réaction des rendements aux apports d'azote qui est due à une texture du sol variable.[49] Lors d'essais de fertirrigation, il était constaté que les plants de tomates ainsi traités avaient eu un meilleur rendement que ceux non traités.[49]

Épandage d'engrais à libération lente

Un engrais à libération lente est un engrais qui, une fois épandu, libère à une vitesse prédéterminée ses éléments nutritifs, notamment l'azote. Il a la même utilité que les applications fractionnées, soit de fournir de l'azote en fonction des besoins du plant.

Ce type d'engrais a notamment pour avantage de permettre de gagner du temps. Il peut être appliqué en une seule fois, en début de saison. Les risques de pertes par lessivage sont réduits, et le producteur n'a pas à retourner dans son champ pour faire d'autres épandages.

Les engrais à libération lente présentent également certains désavantages incontestables : ils peuvent exiger du matériel spécial; ils sont plus chers que les engrais classiques; la libération de l'azote peut ne pas coïncider avec les besoins de la culture; la quantité initiale d'engrais appliquée ne tient pas compte de l'azote apporté par la minéralisation; et les résultats de l'analyse du sol sont plus difficiles à interpréter.

Les marchands de ce type d'engrais sont bien informés sur ces produits et sont en mesure de fournir les caractéristiques particulières de chacun (enrobé, polymérisé, concentré, avec inhibiteurs de nitrification, relativement hydrosoluble et hydro-insoluble).

Application localisée des engrais

Afin d'empêcher le lessivage, il faut localiser les engrais près des plants, notamment dans le cas d'une culture comme la citrouille qui est cultivée en lignes relativement espacées.
L'épandage en bandes est une méthode qui permet d'appliquer l'engrais en une bande continue et concentrée près du semis ou des racines du jeune plant, d'où il sera facilement assimilé. Dans le cadre d'un essai, des oignons fertilisés en bandes avec 14 kg N/ha ont produit des rendements semblables à d'autres fertilisés avec 80 kg N/ha à la volée.[50]

Application foliaire

On peut utiliser un pulvérisateur pour appliquer des engrais sur le feuillage des plants. Il s'agit d'une méthode courante d'application des principes nutritifs secondaires et des oligoéléments, mais elle peut également servir à apporter de l'azote. Les feuilles peuvent absorber des minéraux, mais moins efficacement que les racines. L'application foliaire ne permet toutefois pas de répondre à l'ensemble des besoins en azote d'une culture.

Il faut prendre certaines précautions avant d'utiliser des engrais foliaires. Évitez d'appliquer l'engrais lorsque le soleil brille ou que le temps est très sec ou venteux. Lorsque de telles conditions prévalent, l'évaporation est très rapide et les risques de brûlure des feuilles augmentent. Conformez-vous aux recommandations du fabricant sur la dilution maximale du produit.

L'application foliaire est probablement la méthode la mieux indiquée pour remédier à une carence en éléments nutritifs. Il est essentiel que les végétaux profitent d'une nutrition adéquate lors de certains stades de leur développement. L'engrais appliqué sur le feuillage est absorbé très rapidement et peut contribuer à remédier plus vite à une carence qu'un engrais épandu sur le sol.

5.2 Croissance des cultures

Des cultures en santé et à croissance vigoureuse sont l'un des meilleurs moyens d'empêcher le lessivage des nitrates. Des cultures en santé se développent bien et absorbent rapidement l'azote présent dans le sol.

5.3 Engrais verts (ou cultures-pièges)

Un engrais vert est une plante cultivée expressément pour être enfouie dans le sol et l'enrichir en matière organique. Les engrais verts qui ne sont pas des cultures légumières peuvent contribuer de deux manières à réduire le lessivage des nitrates : ils absorbent les nitrates et, en absorbant l'eau, réduisent la quantité en circulation qui peut être drainée.[27] Certaines cultures, comme les radis oléifères, la moutarde et l'orge, ont de longues racines capables de puiser les nitrates à une grande profondeur dans le sol. Le blé ou le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) peut aussi être planté comme engrais vert pour extraire les nitrates du sol. Le blé assimile une plus grande quantité de nitrates dans le sol que le trèfle.[51] Le soja est une autre culture qui absorbe efficacement les nitrates du sol.[52]

Un engrais vert peut être planté immédiatement après la récolte d'une culture légumière en juillet ou en août. Au fil de sa croissance, il absorbe tout azote minéral excédentaire ainsi que l'azote des résidus frais de la culture légumière qui devient rapidement disponible. Il empêche ainsi l'azote d'être lessivé par les précipitations automnales. La période d'incorporation de l'engrais vert est la clé d'une utilisation efficace de l'azote. L'incorporation devrait avoir lieu aussi tard que possible au cours de la saison, afin que la matière organique gèle avant que la minéralisation puisse se produire. Lors du dégel printanier, la minéralisation se produira à mesure que la température s'élèvera et que l'oxygène deviendra disponible (c.-à-d., une fois les inondations terminées). Cette période coïncide avec le début de la saison agricole, et l'azote devient donc disponible juste au bon moment!

Lors d'un essai effectué en Allemagne, la plantation d'un engrais vert pendant qu'une culture légumière était encore en croissance s'est soldée par un échec. Toutefois, faute de temps, l'engrais vert peut être directement semé dans les résidus de la culture légumière. Cette méthode a été appliquée à la production du brocoli, du chou rouge, de l'épinard de fin d'été, du chou de Bruxelles et du chou-fleur. Cependant, elle présente un désavantage à cause de la présence de résidus qui permettent l'établissement de mauvaises herbes et de maladies.

5.4 Engrais organiques

L'incorporation d'engrais organiques, comme le fumier ou le compost, augmente la quantité d'azote lessivable dans le sol, car la fraction azotée minérale est directement lessivable. Avec le temps, l'azote organique se minéralisera également et sera sujet au lessivage. En raison de ces effets, il est préférable d'incorporer le fumier et le compost très tard en saison, juste avant le gel, ou au printemps et au début de l'été, périodes pendant lesquelles l'azote minéral peut être immédiatement utilisé par les végétaux en croissance et où les températures sont propices à la minéralisation. Les végétaux peuvent ensuite utiliser l'azote minéralisé plus tard au cours du cycle de production.

5.5 Autres sources d'engrais

Dans certains pays, l'emploi du cyanamide calcique ($CaCN_2$, 22-0-0) comme herbicide est autorisé. Ce produit agit également comme un engrais et son apport d'azote (de 20 à 22 %) doit être pris en compte dans le bilan de l'azote.

5.6 Résidus de culture

5.6.1 Méthodes d'incorporation

Les résidus de culture constituent de la matière organique et, à ce titre, font l'objet des mêmes préoccupations que les autres amendements organiques. Il existe différentes méthodes d'incorporation des résidus de culture, mais l'essentiel est de procéder à cette opération le plus tard possible : avant l'hiver ou au printemps. De cette façon, les risques de lessivage sont réduits, car les basses températures ralentissent la libération d'azote.

Il faut faire preuve de prudence lors du labour d'enfouissement des résidus de culture. Les labours qui retournent complètement le sol entraînent des taux de minéralisation très lents des résidus de culture, parce que l'oxygène est

M121

IMPORTANT NOTE CONCERNING THE FOLLOWING PAGES

THE PAGES WHICH FOLLOW HAVE BEEN FILMED TWICE IN ORDER TO OBTAIN THE BEST REPRODUCTIVE QUALITY

USERS SHOULD CONSULT ALL THE PAGES REPRODUCED ON THE FICHE IN ORDER TO OBTAIN A COMPLETE READING OF THE TEXT.

REMARQUE IMPORTANTE CONCERNANT LES PAGES QUI SUIVENT

LES PAGES SUIVANTES ONT ÉTÉ REPRODUITES EN DOUBLE AFIN D'AMÉLIORER LA QUALITÉ DE REPRODUCTION

LES UTILISATEURS DOIVENT CONSULTER TOUTES LES PAGES REPRODUITES SUR LA FICHE AFIN D'OBTENIR LA LECTURE DU TEXTE INTÉGRAL

micromedia
a division of IHS Canada

20 Victoria Street
Toronto, Ontario M5C 2N8
Tel.: (416) 362-5211
Toll Free: 1-800-387-2689
Fax: (416) 362-6161
Email: info@micromedia.on.ca

souvent rare à la profondeur où les résidus sont enfouis. Les labours à arêtes vives sont plus propices à la minéralisation. Ces arêtes chevauchantes emprisonnent l'humidité et permettent également à une quantité adéquate d'oxygène de pénétrer dans les sillons. Lors de la planification de la fertilisation, il est important de laisser les résidus se minéraliser efficacement, mais, en réalité, les labours n'influent pas vraiment sur le lessivage.

Les résidus peuvent être incorporés à l'aide d'un motoculteur, une pratique qui augmente le taux de minéralisation. Le paillage à la surface du sol est une autre façon d'utiliser les résidus, mais ses effets sont encore mal connus.

5.7 Choix de la culture

Le choix d'une culture appropriée, notamment une culture tardive, peut contribuer à empêcher le lessivage des nitrates. Des cultures tardives à enracinement profond, comme le chou de Bruxelles, sont particulièrement efficaces pour absorber les nitrates à une grande profondeur dans le profil de sol. Des résidus de cultures, comme les poireaux et les épinards, libèrent très rapidement de l'azote et peuvent faire augmenter les risques de lessivage des nitrates par les précipitations automnales.

Certains pays ont adopté une loi qui oblige les producteurs établis près de sources d'eau potable à planter certaines cultures pour réduire les risques de pollution des eaux souterraines.

5.8 Irrigation

Il faut gérer soigneusement le volume d'eau appliqué lors des périodes d'irrigation. Un sol saturé en eau ou une tempête entraînera inévitablement un lessivage. Une irrigation excessive au cours d'une brève période est également à éviter.

5.9 Fertilisation azotée suboptimale

Une fertilisation azotée suboptimale prévient le lessivage, car elle réduit la quantité d'azote en circulation dans le sol. Cette pratique a tendance à réduire non seulement la marge de sécurité dans le sol, mais également le rendement. Ainsi, une réduction de l'apport azoté de

Tableau 16 : Diminution de rendement possible lors d'une fertilisation sous-optimale qui prévoit une réduction de 20% de la valeur cible N_{min}

Culture	Profondeur d'enracinement (cm)	Valeur cible Nmin (kg N/ha)	Valeur cible Nmin réduite de 20% (kg N/ha)	Rendement selon la valeur cible Nmin réduite %
Betterave	60	250	200	84
Brocoli	60	300	240	90
Carotte	60	100	80	90-95
Céleri	60	220	175	95-98
Chou blanc	90	350	280	83
Choux de Bruxelles	90	250	200	90-93
Chou de Savoie	90	350	280	80-85
Chou-fleur	60	300	240	86
Épinards	30	220	175	82
Laitue	30	140	110	86
Laitue Boston	30	140	110	90
Poireau	60	220	175	90

Adapté de : Scharpf, 1991

souvent rare à la profondeur où les résidus sont enfouis. Les labours à arêtes vives sont plus propices à la minéralisation. Ces arêtes chevauchantes emprisonnent l'humidité et permettent également à une quantité adéquate d'oxygène de pénétrer dans les sillons. Lors de la planification de la fertilisation, il est important de laisser les résidus se minéraliser efficacement, mais, en réalité, les labours n'influent pas vraiment sur le lessivage.

Les résidus peuvent être incorporés à l'aide d'un motoculteur, une pratique qui augmente le taux de minéralisation. Le paillage à la surface du sol est une autre façon d'utiliser les résidus, mais ses effets sont encore mal connus.

5.7 Choix de la culture

Le choix d'une culture appropriée, notamment une culture tardive, peut contribuer à empêcher le lessivage des nitrates. Des cultures tardives à enracinement profond, comme le chou de Bruxelles, sont particulièrement efficaces pour absorber les nitrates à une grande profondeur dans le profil de sol. Des résidus de cultures, comme les poireaux et les épinards, libèrent très rapidement de l'azote et peuvent faire augmenter les risques de lessivage des nitrates par les précipitations automnales.

Certains pays ont adopté une loi qui oblige les producteurs établis près de sources d'eau potable à planter certaines cultures pour réduire les risques de pollution des eaux souterraines.

5.8 Irrigation

Il faut gérer soigneusement le volume d'eau appliqué lors des périodes d'irrigation. Un sol saturé en eau ou une tempête entraînera inévitablement un lessivage. Une irrigation excessive au cours d'une brève période est également à éviter.

5.9 Fertilisation azotée suboptimale

Une fertilisation azotée suboptimale prévient le lessivage, car elle réduit la quantité d'azote en circulation dans le sol. Cette pratique a tendance à réduire non seulement la marge de sécurité dans le sol, mais également le rendement. Ainsi, une réduction de l'apport azoté de

Tableau 16 : Diminution de rendement possible lors d'une fertilisation sous-optimale qui prévoit une réduction de 20% de la valeur cible N_{min}

Culture	Profondeur d'enracinement (cm)	Valeur cible Nmin (kg N/ha)	Valeur cible Nmin réduite de 20% (kg N/ha)	Rendement selon la valeur cible Nmin réduite %
Betterave	60	250	200	84
Brocoli	60	300	240	90
Carotte	60	100	80	90-95
Céleri	60	220	175	95-98
Chou blanc	90	350	280	83
Choux de Bruxelles	90	250	200	90-93
Chou de Savoie	90	350	280	80-85
Chou-fleur	60	300	240	86
Épinards	30	220	175	82
Laitue	30	140	110	86
Laitue Boston	30	140	110	90
Poireau	60	220	175	90

Adapté de : Scharpf, 1991

20 % réduit d'autant la quantité de nitrates lessivables, mais une diminution du rendement de 15 % est également à prévoir.

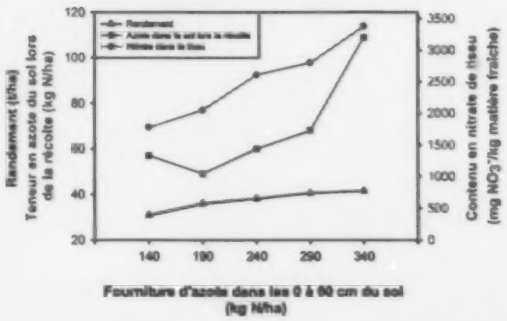
Le rendement des cultures en réaction à une réduction de l'apport d'azote diffère (tableau 16). Le rendement n'est pas le seul aspect dont il faut tenir compte avant de décider d'apporter une fertilisation suboptimale. La qualité est souvent touchée. Une réduction de la teneur en chlorophylle causée par une faible fertilisation azotée, dans le cas des cultures d'épinard, de chou-rave, de laitue ou de chou de Bruxelles, peut entraîner des problèmes de commercialisation. Les marchands n'achètent généralement pas les produits qui ne correspondent pas aux attentes habituelles des consommateurs. De même, de faibles teneurs en nitrates ainsi que des teneurs élevées en sucre et en vitamine C associées à une réduction de l'apport azoté sont considérées comme des caractéristiques souhaitables dans un produit. Les agriculteurs qui utilisent la fertilisation suboptimale doivent équilibrer les inconvénients et les avantages et faire en sorte d'obtenir un produit de qualité qui retiendra tout de même l'attention du consommateur.

Le recours à la fertilisation suboptimale pour empêcher le lessivage est une approche très nouvelle et n'est pas encore devenue une pratique acceptée. Des rendements plus faibles signifient des recettes moindres pour les agriculteurs. Les programmes d'assurance-récole ou de stabilisation du revenu ne sont pas encore prêts à offrir une compensation financière pour diminution de rendement aux agriculteurs dont les terres sont situées dans des zones de conservation de l'eau. Compte tenu du fardeau financier que doivent supporter les agriculteurs qui pratiquent la fertilisation suboptimale et de l'absence d'incitatif en faveur de la réduction du lessivage des nitrates, il est difficile de recommander la fertilisation suboptimale comme une solution de rechange viable.

Toutefois, dans certains cas, la décision de recourir à la fertilisation suboptimale peut être très facile à prendre. Lorsque les rendements demeurent relativement constants et que la teneur en nitrates du sol et des tissus végétaux augmente, il est souvent possible réduire la dose d'engrais sans sacrifier beaucoup le rendement (figure 20).

Figure 20

Relations entre la fourniture d'azote, le rendement, le contenu en nitrate des tissus et la teneur en azote du sol lors de la récolte dans la production de la betterave à sucre



LVG Hanovre-Ahlem

6 Réduction de la teneur en nitrates dans les parties comestibles des légumes

Au cours des dernières décennies, les effets néfastes de la consommation par les humains de nitrates ont soulevé certaines controverses. Les résultats d'études récentes n'ont pu confirmer le lien établi précédemment entre la consommation de nitrates et le cancer en raison de la formation de nitrosamines, des substances cancérogènes.[8,9,10,11] Bien que cette transformation soit théoriquement possible, la consommation de légumes à teneur élevée en nitrates n'entraînerait pas la formation de nitrosamines dans la salive ou le tube digestif. En fait, il semble que l'ingestion de nitrates puisse améliorer certaines réactions immunitaires à des agents pathogènes microbiens, en plus d'avoir certains autres effets bénéfiques mineurs.[6,7] Le cancer est toutefois un sujet très grave, et il convient de répéter que la possibilité que certains cancers soient liés à des régimes alimentaires à teneur élevée en nitrates n'a pas été définitivement écartée. Seul un régime à faible teneur en nitrates peut être recommandé en se fondant sur le principe que la « prudence est mère de sûreté ».

Puisque les teneurs en nitrates sont plus élevées dans les feuilles et les tiges que dans le fruit, les légumes récoltés principalement pour leurs feuilles devraient être produits et surveillés avec soin. Certains pays, comme les Pays-Bas, ont adopté des normes rigoureuses concernant les teneurs en nitrates des légumes-feuilles, comme la laitue. Divers facteurs influent sur la teneur en nitrates des légumes, et le producteur peut jouer un rôle déterminant dans la réduction de ces teneurs.

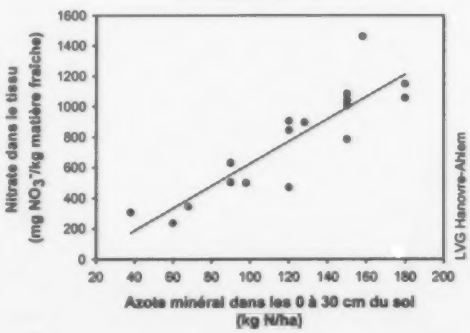
6.1 Facteurs influant sur la teneur en nitrates des parties comestibles des légumes

6.1.1 Fertilisation

Même si les rendements finissent par plafonner malgré l'apport d'azote, la teneur en nitrates des légumes continue d'augmenter. Les végétaux n'utilisent pas les nitrates à des fins structurales ni ne les incorporent à la chlorophylle et à d'autres composés. Ils les gardent en réserve dans leurs tissus foliaires sous forme de nitrates. La disponibilité de l'azote dans le sol influe sur la teneur en nitrates de cultures comme la laitue pommée (figure 21). Les agriculteurs devraient s'efforcer d'apporter des doses d'engrais qui ne permettent pas cette consommation de luxe de nitrates. Puisque l'excès de nitrates n'améliore pas le rendement, l'agriculteur n'a aucun avantage en termes de coûts à le permettre, car en fait il augmente ses coûts de production.

Figure 21

Effet de la teneur en azote minéral du sol sur le contenu en nitrate des tissus de la laitue pommée



6.1.2 Ensoleillement

Le produit comestible d'une récolte qui a profité de nombreuses heures d'ensoleillement a généralement une teneur moins élevée en nitrates que celui qui a été peu exposé à la lumière du soleil (tableau 17). La raison est fort simple : la lumière du soleil stimule la conversion des nitrates en composés organiques.

6.1.3 Variété

La variété peut influer sur la teneur en nitrates des légumes. Différents cultivars ou variétés d'une même espèce cultivée peuvent avoir des capacités différentes d'accumulation des nitrates ou des taux différents de conversion des nitrates en composés organiques.

6.1.4 Maturité de récolte

Les plantes mûres ont des teneurs plus faibles en nitrates que celles qui ne le sont pas. C'est pour cette raison que les plantes qui sont récoltés avant d'atteindre la maturité, comme les épinards, ont des teneurs très élevées en nitrates.

6.2 Mesures de prévention

Les agriculteurs sont des intendants hautement qualifiés des terres. Ils décident des pratiques culturales à utiliser pour produire des légumes et, dans une large mesure, influent sur la qualité des aliments que nous consommons. Ils ont le pouvoir de réduire les risques de toxicité pour la santé et les dangers pour l'environnement que présentent des teneurs élevées en nitrates dans les légumes. Fort heureusement, nombre des méthodes de réduction de la teneur en nitrates des légumes sont tout aussi efficaces pour réduire les risques de lessivage des nitrates.

6.2.1 Éviter la surfertilisation

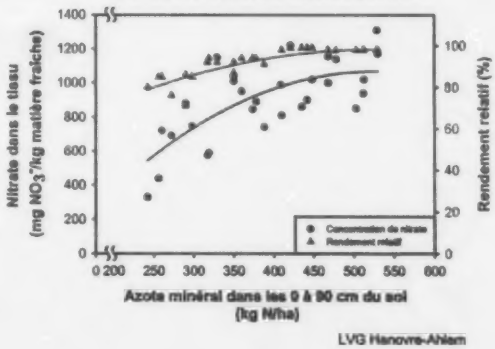
Une fertilisation optimale est préférable à une surfertilisation. La relation entre la fertilisation azotée et la teneur en nitrates des légumes (tableau 18) laisse voir qu'il est possible de réduire la quantité de nitrates présente dans les légumes en prenant soin de ne pas surfertiliser.

6.2.2 Fertilisation azotée suboptimale

Dans les pays où la teneur en nitrates des légumes est réglementée, il peut n'y avoir aucune alternative à la fertilisation suboptimale et à la perte de rendement qui peut s'ensuivre. La betterave est une culture à teneur naturellement élevée en nitrates. La réglementation de certains pays limitent cette teneur à 3 000 mg par kg de betteraves fraîches. En réalité, le seul moyen de respecter cette norme est d'utiliser une dose moindre d'engrais que celle nécessaire à l'obtention d'un rendement maximal. Certaines études effectuées en Allemagne ont examiné la fertilisation du chou blanc (figure 22). En vertu de la réglementation, la portion comestible ne peut contenir plus de 1 000 mg de nitrate par kg de chou frais. Pour respecter cette norme, il faut

Figure 22

Effet de la teneur en azote du sol sur le rendement relatif et la concentration de nitrate dans les tissus de chou



LVG Hanovre-Ahlem

Tableau 17 : Relation entre l'ensoleillement et le contenu en nitrate des tissus de betteraves à sucre fertilisés avec cinq différents taux d'azote.

Année	Ensoleillement	Rendement	Contenu en nitrate des tissus (mg NO_3^-/kg matière fraîche)				
			Fertilisation azotée (Azote dans le sol au printemps + engrais) (kg N/ha)				
	(kWh/m²)	(t/ha)	125	185	245	305	365
1984	93	42.5	2000	2350	2750	3000	3450
1985	72	60.0	400	640	1010	1790	1820

Adapté de : Scharpf, 1991

Tableau 18 : Relation entre la fertilisation azotée et le contenu en nitrate des tissus de quelques cultures légumières

Fertilisation azotée	Concentration de nitrate dans les tissus (mg NO_3/kg matière fraîche)			
(kg N/ha)	Chou-fleur	Chou-rave	Laitue	Carotte
0	26-154	47-307	150-718	104-335
75	-	-	490-1980	-
100	-	122-627	-	220-540
150	-	-	844-2799	-
200	109-416	381-1117	-	251-613
400	208-549	-	-	-

Scharpf, 1991

Tableau 19 : Baisse de rendement associée à une limitation à 1000, 2000, 3000 ou 4000 mg/kg de matière fraîche du contenu en nitrate de tissus de légumes

Culture	Baisse de rendement (%)			
	Seuil de nitrate dans le tissu (mg/kg matière fraîche)			
	1000	2000	3000	4000
Betterave	30	20	10	0
Chou blanc	10	0	0	0
Chou chinois	30	0	0	0
Endive	2	0	0	0
Épinard	40	10	10	0
Laitue	70	40	0	0
Laitue Boston	14	0	0	0
Radis	50	0	0	0

Scharpf and Wehrmann, 1991

Pour respecter cette norme, il faut ramener à 350 kg la quantité d'azote apportée à la culture, en sacrifiant 10 % du rendement. Des diminutions de rendement accompagnent souvent la fertilisation suboptimale qui est pratiquée afin de respecter les normes de la réglementation (tableau 19).

6.2.3 Multiples applications d'engrais

Une technique de réduction des nitrates dans les légumes consiste à effectuer un épandage initial plus important que les suivants dans le cadre d'applications fractionnées. Cette recommandation vise à réduire la quantité de nitrates dans les parties comestibles de la plante, mais peut provoquer la contamination des eaux souterraines si de fortes pluies tombent après le premier épandage. Cette approche exige de faire preuve de vigilance.

6.2.4 Engrais ammoniacaux

L'utilisation d'engrais ammoniacaux comportant des inhibiteurs de nitrification empêche la conversion de l'ammonium en nitrates dans le sol en inhibant les micro-organismes nitrifiants. Il en résulte une assimilation directe de l'ammonium par la plante. Un engrais ammoniacal concentré épandu en bandes latérales près des plants résiste relativement bien à la nitrification et approvisionne directement en ammonium les racines des plantes.

6.2.5 Engrais à libération lente

Selon les résultats de plusieurs expériences, la teneur en nitrates des légumes cultivés à l'aide d'engrais à libération lente est plus faible qu'avec les engrais classiques. Grâce aux engrais à libération lente, l'azote est mieux distribué pendant toute la saison de végétation et sa disponibilité est réduite à la fin de la saison.

6.2.6 Récolte

Pour réduire la teneur en nitrates des parties comestibles des plantes, la récolte devrait avoir lieu, dans la mesure du possible, après plusieurs heures d'ensoleillement, et les tissus qui assimilent la plus grande quantité de nitrates devraient si possible être exclus. Ainsi, les pétioles d'une récolte d'épinards ont une teneur beaucoup plus élevée en nitrates que les feuilles. L'exclusion des pétioles se traduira par une plus faible teneur en nitrates, mais aura pour effet de réduire les rendements.

7 Conclusions

La fertilisation azotée est un aspect important de la production légumière. Lorsque l'azote est insuffisant, le rendement de la culture est faible. C'est pourquoi les agriculteurs sont portés à épandre d'importantes quantités d'engrais azoté sur leurs cultures légumières. La difficulté de la fertilisation azotée est de déterminer la juste dose à appliquer pour obtenir un rendement optimal et d'éviter les excès qui conduisent à de graves répercussions sur l'environnement et la santé. De plus, nombre de cultures légumières accumulent dans leurs tissus un excès de nitrates dont la teneur peut être réglementée par les gouvernements. L'agriculteur a la lourde tâche d'atteindre cet équilibre. Le présent rapport a proposé un moyen d'atteindre cet équilibre grâce à la détermination des doses optimales d'engrais azoté à apporter et à l'application de pratiques culturales qui réduisent le lessivage et la teneur en nitrates des légumes.

Annexe I

Procédures de dosage rapide des nitrates dans les extraits de sols

Introduction :

En conditions normales, l'azote sous forme nitrate ($N\text{-}NO_3^-$) constitue plus de 90% de l'azote minéral du sol. L'azote déjà présent sous cette forme doit donc logiquement être considéré avant de décider d'une fumure azotée. L'utilisation d'une technique rapide de dosage des nitrates représente un outil valable pour donner une information ponctuelle sur l'état du sol à fertiliser.

Avertissement!

Les tests rapides du contenu en nitrate des sols et des plantes sont remarquablement sensibles, compte tenu de la simplicité de la méthode. La valeur des résultats qu'ils procurent est directement fonction du soin apporté aux opérations d'échantillonnage et d'analyse. Il importe de réaliser les manipulations avec grand soin et de manière identique afin que les résultats soient comparables.

Soin des réactifs et des bandelettes :

- Prendre grand soin de ne pas contaminer les réactifs.
- Ne pas les exposer inutilement à l'air et à la poussière.
- Conserver les bandelettes au réfrigérateur et les utiliser au plus tard à la date de péremption.
- Refermer immédiatement un tube après y avoir prélevé des bandelettes.
- Lorsqu'un tube est entamé, le fabricant recommande de le garder dans un endroit sec à la température ambiante.

Matériel :

- 1 perceuse sans fil DeWalt à embrayage Versa-Clutch de 14,4V avec mèche de ½ pouce
- Seau de plastique
- Sacs de plastique
- Glacière et blocs de congélation
- 1 appareil Nitrachek 404 (munie d'une pile 9 V)
- Bandelettes réactives Test Nitrates de Merckoquant #10020 (Geneq)
- Solution d'extraction (w/chloride) #514730 10 sachets (Geneq)
- Solution étalon de 10 ppm de Nitrate-N (w/chloride) #140301-04 125ml (Geneq)
- Solution d'enrichissement de 1000 ppm en KNO_3 (conservée au réfrigérateur)
- Eau distillée ou eau peu minéralisée (à contrôler avant usage)
- Tubes Falcon de 50 ml gradués aux 5 ml

- Balance de précision
- Filtre Whatman # 1 de 11 cm de diamètre
- Four maintenu à 105°C

Échantillonnage des sols :

1. Prélever à l'aide d'une perceuse sans fil munie d'une mèche de ½ pouce, de 10 à 12 sous-échantillons (de façon aléatoire) par parcelles à étudier.
2. Travailler par horizon de 0-30 cm ou de 30-60 cm.
3. Enlever de chaque sous-échantillon 1 cm de sol correspondant à la surface du sol.
4. Homogénéiser les 10 à 12 sous-échantillons dans le seau de plastique.
5. Transférer environs 500 mL de sol dans un sac de plastique.
6. L'étiquette identifiant l'échantillon devra comporter les informations suivantes; # de parcelle, horizon, date de l'échantillonnage.
7. Placer dans une glacière les sacs contenant les échantillons.
8. Procéder à l'extraction des nitrates la journée même, sinon congeler les échantillons le plus rapidement possible.

Préparation des solutions :

Solution de KNO_3 à 1000 ppm

Il arrive fréquemment que la teneur en nitrates des sols soit très basse. Les valeurs plus basses que 5 ppm ne peuvent être lu par l'appareil Nitrachek. Une étape d'enrichissement en KNO_3 des échantillons à été ajouté de façon à éliminer toutes les lectures « LO » inutilisables.

1. Peser 7,2 grammes de KNO_3 (99.9% en pureté) par litre d'eau distillée.

Solution extractive (solution préparée chaque jour)

1. Dans un ballon de 500ml verser le contenu d'un sachet de "Extracting Power
2. Packet W/Chloride."
3. Ajouter 3ml de la solution KNO_3 1000ppm (ce qui équivaut à 6ppm de $N\text{-}NO_3$).
4. Compléter avec de l'eau distillée.
5. Bien agiter.

Préparation des échantillons :

Extraction :

1. Verser la solution extractive jusqu'à la ligne de 30 ml (précisément) dans un tube Falcon.
2. Tarer le tube Falcon (dans un bécher) contenant la solution puis ajouter l'équivalent de 10 ml de sol à extraire. Le mélange sol-solution occupe précisément 40ml dans le tube Falcon. Il est important de prendre un échantillon représentatif (sans roche) en homogénéisant le plus possible le sol contenu dans le sac.
3. Noter le poids du sol ajouté (A). Refermer le tube Falcon.

4. Agiter vigoureusement pendant 2 minutes puis laisser déposer durant 2 heures.

Filtration :

1. Environ 10 minutes avant les 2 heures placer un papier filtre #1 de 11cm (plié en 8) dans le tube Falcon de manière à obtenir au moins 5mm de surnageant clair.

Dosage :

- Sortir les bandelettes et la solution étalon de 10ppm du réfrigérateur au moins 30 minutes avant de les utiliser.

Vérification :

Avant de débuter une série de lecture toujours vérifier l'état de l'appareil à l'aide de la bandelette test en matière plastique fournit lors de l'achat. Cette vérification peut-être faite à tout moment au cours d'une longue série d'échantillons.

1. Ouvrir la porte de l'appareil. (permet d'allumer l'appareil)
2. L'affichage indique « 8888 » puis « CAL »
3. Vérifier si le lot affiché est le lot #5.
4. Placer le côté blanc de la bandelette de plastique face à la cellule de lecture pour faire la standardisation "0" habituelle.
5. Refermer la porte, 2 bips sonores sont émis et l'affichage « GO » apparaît. Retirer la bandelette de l'appareil en prenant soin de laisser la porte ouverte.
6. Une fois le compte à rebours de 60 secondes terminé, introduire la bandelette test côté gris face à la cellule de lecture. Refermer la porte.
7. La lecture obtenue devrait se situer dans l'intervalle indiqué au dos du boîtier.
8. Sinon l'orifice de lecture nécessite un nettoyage.

Calibration et dosage de la solution extractive:

- Prendre une lecture de la solution d'étalonnage et de la solution extractive en suivant les étapes a) à h). La lecture de la solution d'étalonnage constitue la valeur « C » et celle de la solution extractive constitue la valeur « B ».

- Ces valeurs seront utilisées dans le calcul de la concentration en nitrate des échantillons.

- La calibration et le dosage de la solution extractive devraient être faites à toutes les 12 lectures.

1. Soulever la porte du détecteur de l'appareil Nitrachek. L'appareil va afficher « 888 » et après, « CAL ». Vérifier que le lot afficher c'est le « 5 ».

2. Initialiser le réflectomètre en introduisant la bandelette sèche (tampons vers le dessous) dans l'appareil. Refermer la porte.
3. À l'indication « GO » de l'appareil, retirer la bandelette en prenant soin de laisser la porte du détecteur ouverte.
4. Tremper immédiatement la bandelette dans la solution jusqu'à ce que l'appareil fasse entendre un « bip ».
5. Retirer alors la bandelette de la solution et la secouer vigoureusement pour essorer l'excès de solution.
6. Une fois le compte à rebours de 60 secondes terminé (au signal de l'appareil), introduire la bandelette (tampons vers le dessous) dans la fente de lecture et refermer la porte.
7. Prendre en note le chiffre fourni par l'appareil.

Dosage d'extrait de sol :

Prendre une lecture en suivant les étapes a) à h).
Prendre en note le résultat.
Le chiffre obtenu pour la lecture de l'extrait de sol constitue la valeur « D » et sera utilisé dans le calcul de la concentration en nitrate de l'échantillons

Détermination du % d'humidité du sol :

Noter le poids d'une nacelle d'aluminium (E).
Peser environ 30 grammes de sol (tarer la nacelle d'Al et noter le poids humide (F) pour établir son % d'humidité.
Placer le sol à 105 °C pour la nuit (minimum de 16 heures).
Le lendemain noter le poids sec, incluant le poids de la nacelle d'Al (G).

Calculs :

Calculer le poids sec du sol extrait (X) :

$A*((G-E)/F) = X$

Puis placer X dans l'équation suivante afin de déterminer le nombre de ppm de N- NO_3 dans le sol :

Calculer la concentration de nitrates dans le sol :

$$(D-B) * \frac{[30+A-X] * (10/C)}{X} = \text{ppm de N-NO}_3 \text{ dans le sol}$$

Conversion de ppm à kg $N\text{-}NO_3^-$ par hectare :

ppm de $N\text{-}NO_3$ dans le sol * facteur de conversion = kg $N\text{-}NO_3$ par hectare

ppm vers kg/ha facteurs de conversion

Profondeur de l'échantillon de sol	Facteur de conversion
15 cm	1.98
17 cm	2.24
30 cm	3.96
34 cm	4.48
45 cm	5.94
51 cm	6.72
60 cm	7.92
68 cm	8.96

Appendix II

Procédures relatives à l'extraction et le dosage de nitrates dans les extraits de tissus

Échantillonnage :

Le contenu en nitrate des plantes est très affecté par la quantité de lumière; il est donc préférable de réaliser l'échantillonnage aussitôt que possible le matin alors que la lumière est encore faible. On recommande de prélever les échantillons avant 10h. En prélevant les échantillons tôt, on augmente également les chances que les tissus soient gorgés d'eau; ce qui facilite l'extraction de la sève.

Il est recommandé de prélever la plus jeune feuille mature, c'est à dire la dernière feuille pleinement déployée. Dans le cas des graminées, c'est la base de la tige qui doit être prélevée. Prendre autant d'échantillons « représentatifs » que possible. Utiliser des sacs de plastique. Les tissus devraient êtres placés au frais et à l'abri de la lumière dans les meilleurs délais. Par la suite, on doit retirer le limbe des feuilles pour ne conserver que le pétiole.

Matériel :

- Presse-ail
- Eau distillée
- Solution standard 100 ppm-NO_3^-
- Deux petits béchers
- Appareil Nitrachek
- Bandelettes
- Deux compte-gouttes
- Couteau
- Cylindre gradué (5 ml)

Préparation d'échantillons :

Extraction de la sève :

1. Trancher la partie de plante qui sera l'objet de l'extraction en petits morceaux d'un demi-centimètre à un centimètre
2. Introduire quelques-uns de ces morceaux, prélevés au hasard dans le lot, dans la presse-ail
3. Presser les tissus et faire tomber les gouttes de sève dans un bécher propre

Dilution :

Tandis que les extraits de sol ont souvent une concentration de nitrates trop faible pour être décelé par l'appareil Nitrachek, les extraits de tissus ont habituellement une concentration trop forte (>500ppm). Il faut alors diluer l'extrait avant de le doser avec l'appareil, ce qui nécessite un calcul en tenant compte du facteur de dilution pour arriver au bon résultat. La dilution pourrait également être faite afin de réduire l'interférence causée par la coloration de certains extraits.

La dilution devrait être effectuée en utilisant de l'eau distillée ou déminéralisée. Alternativement, de l'eau courante pourrait être utilisée, mais une mesure du contenu en nitrates doit être faite et sera déduite de la lecture de l'échantillon.

Dilution 25

Prélever la sève du bécher au moyen du compte-gouttes
Déposer deux gouttes au fond d'un bécher propre
Ajouter 48 gouttes d'eau
Agiter de façon à homogénéiser la solution

Note : Afin d'accélérer les opérations lors de la mesure d'un grand nombre d'échantillons, il est possible de mesurer dans un cylindre gradué le nombre de ml que représente 48 gouttes, et d'utiliser le cylindre gradué pour les mesures subséquentes. Un cylindre gradué de 5 ml est recommandé. Il est nécessaire de refaire cette estimation lorsque l'on change de compte-gouttes ou lorsque la pression atmosphérique a changé parce que la grosseur des gouttes peut varier sensiblement.

Dilution 50

Si la concentration en nitrates obtenue par la dilution 25 dépasse les limites de l'appareil, il est nécessaire de diluer la sève 50 fois

Prélever la sève du bécher au moyen du compte-gouttes
Déposer deux gouttes au fond d'un bécher propre
Ajouter 98 gouttes d'eau
Agiter de façon à homogénéiser la solution

Note : Les extraits peuvent être congelés au besoin. Pour être dosés ultérieurement.

Dosage de nitrate :

- Sortir les bandelettes et les solutions au moins une demi-heure avant usage.

Vérification de l'appareil :

Avant de débuter une série de lecture toujours vérifier l'état de l'appareil à l'aide de la bandelette test en matière plastique fournit lors de l'achat. Cette vérification peut-être faite à tout moment au cours d'une longue série d'échantillons.

1. Ouvrir la porte de l'appareil. (permet d'allumer l'appareil)
2. L'affichage indique « 8888 » puis « CAL »
3. Vérifier si le lot affiché est le lot #5.
4. Placer le côté blanc de la bandelette de plastique face à la cellule de lecture pour faire la standardisation "0" habituelle.
5. Refermer la porte, 2 bips sonores sont émis et l'affichage « GO » apparaît. Retirer la bandelette de l'appareil en prenant soin de laisser la porte ouverte.
6. Une fois le compte à rebours de 60 secondes terminé, introduire la bandelette test côté gris face à la cellule de lecture. Refermer la porte.
7. La lecture obtenue devrait se situer dans l'intervalle indiqué au dos du boîtier.
8. Sinon l'orifice de lecture nécessite un nettoyage.

Calibration :

- Prendre une lecture de la solution d'étalonnage en suivant les étapes a) à h). Ce chiffre constitue la valeur « C » pour une lecture de calibration, et sera utilisé dans le calcul de la concentration en nitrates des échantillons. Une nouvelle calibration devrait être faite à toutes les 12 lectures

- Soulever la porte du détecteur de l'appareil Nitrachek. L'appareil va afficher « 888 » et après, « CAL ». Vérifier que le lot afficher est le lot #5.
- Initialiser le réflectomètre en introduisant la bandelette sèche (tampons vers le dessous) dans l'appareil. Refermer la porte.
- À l'indication « GO » de l'appareil, retirer la bandelette en prenant soin de laisser la porte du détecteur ouverte
- Tremper immédiatement la bandelette dans la solution jusqu'à ce que l'appareil fasse entendre un « bip »
- Retirer alors la bandelette de la solution et la secouer vigoureusement pour essorer l'excès de solution
- Une fois le compte à rebours de 60 secondes terminé (au signal de l'appareil), introduire la bandelette (tampons vers le dessous) dans la fente de lecture et refermer la porte
- Prendre en note le chiffre fourni par l'appareil

Dosage d'extrait de sève :

1. Prendre une lecture en suivant les étapes a) à h).
2. Prendre en note le résultat.
3. Ce chiffre constitue la valeur « D » et sera utilisé dans le calcul de la concentration en nitrates de l'échantillon
4. Entre chaque échantillon, nettoyer et assécher les bécher et rincer l'intérieur du compte-gouttes qui prélève la sève.

Note : Dans le cas ou l'extrait à été préparé en triplicat, la valeur D représente la moyenne des trois lectures. ($D_1 + D_2 + D_3 / 3$)

Calcul de concentration en nitrate de la sève :

La lecture de l'appareil Nitrachek est une mesure relative. Il faut donc la corriger en utilisant le facteur de dilution et la lecture obtenue lors la calibration.

Concentration en nitrate (ppm NO_3^-) = (D * 100 / C) * facteur de dilution (25 ou 50 selon le cas).

8 Références

[1] Lewis, O. 1986. Plants and Nitrogen. London: Edward Arnold, 104 pp.

[2] Everaarts, A.P. 1994. Nitrogen fertilization and head rot in broccoli. Netherlands Journal of Agricultural Science. 42: 195-201.

[3] Rahn, C.R., Paterson, C.D. et Vaidyanathan, L.V.V. 1993. Improving the use of nitrogen in *Brassicae* rotations. Acta Horticulturae. 339: 207-218.

[4] Sorenson, J.N., Johansen, A.S. et Poulsen, N. 1994. Influence of growth conditions on the value of crisphead lettuce: 1. Marketable and nutritional quality as affected by nitrogen supply, cultivar and plant age. Plant Foods for Human Nutrition Dordrecht. 46(1): 1-11.

[5] Babik, I., Rumpel, J. et Elkner, K. 1996. The influence of nitrogen fertilization on yield, quality and senescence of Brussels sprouts. Acta Horticulturae 407: 353-359.

[6] Duncan, C., Li, H., Dykhuizen, R., Frazer, R., Johnston, P., McKnight, G., Smith, L., Lamza, K., McKenzie, H., Batt, L., Kelly, D., Golden, M., Benjamin, N. et Leifert, C. 1997. Protection against oral and gastrointestinal diseases: Importance of dietary nitrate intake, oral nitrate reduction and enterosalivary nitrate circulation. Comparative Biochemistry and Physiololgy Part A Physiology 118(4): 939-948.

[7] McKnight, G.M., Duncan, C.W., Leifert, C., et Golden, M.H. 1999. Dietary nitrate in man: friend or foe? British Journal of Nutrition 81(5): 349-358.

[8] Cantor, K.P. 1997. Drinking water and cancer. Cancer Causes and Control 8(3): 292-308.

[9] Barrett, J.H., Parslow, R.C., McKinney, P.A., Law, G.R. et Forman, D. 1998. Nitrate in drinking water and the incidence of gastric, esophageal, and brain cancer in Yorkshire, England. Cancer Causes and Control 9(2): 153-159.

[10] van Loon, A.J., Botterweck, A.A., Goldbohm, R.A., Brants, H.A., van Kleveren, J.D. et van den Brandt, P.A. 1998. Intake of nitrate and nitrite and the risk of gastric cancer: a prospective cohort study. British Journal of Cancer 78(1): 129-35.

[11] van Leeuwen, J.A., Waltner-Toews, D., Abernathy, T., et Shoukri, M. 1999. Associations between stomach cancer incidence and drinking water contamination with atrazine and nitrate in Ontario (Canada) agroecosystems. International Journal of Epidemiology 28(5): 836-840.

[12] Babik, I., Rumpel, J. et Elkner, K. 1996. The influence of nitrogen fertilization on yield, quality and senescence of Brussels sprouts. Acta Horticulturae 407: 353-359.

[13] Malhi, S.S. et Nyborg, M. 1986. Increase in mineral N in soils during winter and loss of mineral N during early spring in north-central Alberta. Canadian Journal of Soil Science 66: 397-409.

[14] Rahn, C.R., Greenwood, D.J. et Draycott, A. 1996. Prediction of nitrogen fertilizer requirement with HRI WELL_N Computer Model. In: Progress in Nitrogen Cycling. Proceedings of 8th Nitrogen Fixation Workshop, University of Ghent, 5-8 September 1994. pp. 255-258.

[15] Lorenz, H.-P., Schlaghecken, J., Engl, G. Maync., A. et Ziegler, J. 1989. Ordnunsegemässe Stickstoff-Versorgung im Freiland-Gemüsebau—KNS-System. Mainz; Ministerium für Landwirtshaft, Weinbau und Forsten Rheinland Pfalz, 85 pp.

[16] [CPVQ] Conseil des productions végétales du Québec inc. 1996. Grilles de reference en fertilization. 2nd Edition. Agdex 540.

[17] Whitmore, A.P. et Groot, J.J.R. 1994. The mineralization of N from finely or coarsely chopped crop residues: measurements and modelling. European Journal of Agronomy 3(4): 367-373.

[18] Guérette, V., Béléc, C., Tremblay, N., Weier, U. et Scharpf, H.-C. 2000. N contribution from mineralization of vegetable crop residues. Dans: Proceedings of the International Society of Horticultural Science Workshop: Toward an Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production. September 11-14, Wageningen, the Netherlands.

[19] Guvernement du Québec. 1997. Réduction de la pollution d'origine agricole. [Q-2, r. 18.2] D.742-97.

[20] [CREAQ] Le comité de références économiques en agriculture du Québec. 1995. Fumier de ferme; Valeur fertilisante. Agdex 538. Québec; Groupe Géagri, Inc.

[21] Christen, A.-M. 1997. Quelques notions de fertilisation. Québec; Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'alimenation du Québec et Union des producteurs agricoles. 27 pp.

[22] Gagnon, B. et Berrouard, S. 1994. Effects of several organic fertilizers on growth of greenhouse tomato transplants. Canadian Journal of Plant Science 74: 167-168.

[23] Choi, J.M. et Nelson, P.V. 1996. Developing a slow-release nitrogen fertilizer from organic sources. III. Isolation and action of a feather-degrading actinomycete. 121(4): 639-643.

[24] [NADP] National Atmospheric Deposition Program. 2000. Nitrogen in the Nation's Rain. Date d'accès : 06/03/01. http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/brochures/nitrogen.pdf

[25] Scheffer, P. et Schachtschabel, F. 1989. Lehrbuch der Bodenkunde 12. Auflage. Stuttgart; Ferdinand Enke Verlag.

[26] Weier, U. 1992. Effect of splitting N fertilizer on yield of broccoli. Versuche in Deutschen Gartenbau. No. 26.

[27] Comité Nitrates. Engrais verts et nitrates. Communiqué No. 32. Gembloux, Belgium. 3pp.

[28] Council for Agricultural Science and Technology. 1992. Water Quality: Agriculture's Role, Part 5 of 6. Dans : Water Quality: Agriculture's Role. Task Force Report, No. 120. Date d'accès : 31/08/00. http://www.inform.umd.edu/EdRes/Topic/AgrEnv/ndd/watermgt/WATER_QUALITY_AGRICULTURES_ROLE_PART_5_OF_6.html

[29] Gysi, C. 1994. Wasser- und Stickstoff-verlagerung im Jahresverlauf. Agrarforschung 1(4): 173-178.

[30] Morris, D.T. et Stevenson, C.K. 1997. Nitrogen fertilizer materials for field crops. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs Factsheet #542. Date d'accès : 14/08/00. http://www.gov.on.ca/OMAFRA/english/crops/facts/90-201.htm

[31] Rahn, C., Vaughan, A., Ramos, C., Fink, M., Gysi, C., Riley, H., Elia, A. et De Neve, S. 1997. Computer models as research tools for field vegetable crops. Inter-laboratory visit – Horticultural Research International, Wellesbourne, UK. 12-14 November 1997. Date d'accès: 06/03/01. http://www.hri.ac.uk/enveg/lab/wellesbourne.htm

[32] Guttormsen, G. et Riley, H. 1996. Testing a nitrogen advisory model for vegetables. Acta Horticulturae. 428: 205-214.

[33] Goodlass, G., Rahn, C., Shepherd, M.A., Chalmers, A.G. et Seeney, F.M. 1997. The nitrogen requirement of vegetables: Comparisons of yield response models and recommendation systems. Journal of Horticultural Science. 72(2): 239-254.

[34] Hartz, T.K., Bendixen, W.E. et Wierdsma, L. 2000. The value of presidedress soil nitrate testing as a nitrogen management tool in irrigated vegetable production. HortScience 35(4): 651-656.

[35] University of Minnesota. 1996. Nitrate test offers economic, environmental benefits for potato farmers. News information, Minnesota's Future. No. 64.

[36] Coulombe, J., Villeneuve, S., Bélec, C. et Tremblay, N. 1999. Evaluation of soil and petiole sap nitrate quick tests for broccoli in Québec. Acta Horticulturae 506: 147-152.

[37] Berry, D. et Thicoipe, J.-P. 1993. Le test azote: un outil fiable pour le pilotage de la fertilisation azotée en cultures légumières. Acta Horticulturae 354: 125-132.

[38] Delgado, J.A. et Follett, R.F. 1998. Sap test to determine nitrate-nitrogen concentrations in aboveground biomass of winter cover crops. Communications in Soil Science and Plant Analysis 29(5&6): 545-559.

[39] Errebhi, M., Rosen, C.J. et Birong, D.E. 1998. Calibration of a petiole sap nitrate test for irrigated "Russet Burbank" potato. Communications in Soil Science and Plant Analysis 29(1&2): 23-35.

[40] Bierman, P., Wall, T. et Fuhrmann, L. 1999. Quick-tests to monitor plant N & K status and manage fertilizer applications. Date d'accès : 31/08/00. http://www.ag.ohio-state.edu/~prec/soil/ovpgsum.htm

[41] Piekielek, W. P. et Fox, R.H. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. Agronomy Journal 84(1): 59-65.

[42] Scharpf, H.-C. et Wehrmann, J. 1991. Nitrat in Grundwasser und Nahrungspflanzen. AID-Heft 1136. Bonn; Auswertungs-und Informationdienst für Ernährung, Landwirstschaft und Forsten e.V.

[43] Lorenz, H.-P., Schlaghecken, J., Engl, G. Maync., A. et Ziegler, J. 1989. Ordnunsegemässe Stickstoff-Versorgung im Freiland-Gemüsebau—KNS-System. Mainz; Ministerium für Landwirtshaft, Weinbau und Forsten Rheinland Pfalz, 85 pp.

[44] Duval, Jean. 1995. Le rôle des légumineuses dans la pollution par les nitrates. Ecological Agriculture Projects. Date d'accès : 1999. http://www.eap.mcgill.ca/AgroBio/ab310-08.htm

[45] Société Canadienne de pédiatrie, les Diététistes du Canada et Santé Canada. 1988. La nutrition du nourrisson né à terme et en santé. Date d'accès: 1999. http://www.cybercable.tm.fr/~biblioa/nutrition_nourrisson.html

[46] Reynolds, W.D., Campbell, C.A., Chang, C., Cho, C.M., Ewanek, J.H., Kachanoski, R.G., MacLeod, J.A., Milburn, P.H., Simard, R.R., Webster, G.R.B. et Zebarth, B.J. 1995.Contamination agrochimique des eaux souterraines. Dans: Acton, D.F. and Gregorich, L.J. (eds.) La santé de nos sols. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada. Publication 1906/F. Date d'accès : 03/03/01. http://res.agr.ca/CANSIS/PUBLICTION/HEALTH/~chap10-4.htm

[47] Batal, K.M., Bondari, K., Granberry, D.M. et Mullinix, B.G. 1994. Effects of source, rate, and frequency of N application on yield, marketable grades and rot incidence of sweet onion (*Allium cepa* L. cv. Granex-33). Journal of Horticultural Science 69: 1043-1051.

[48] Brewster, J.L. et Butler, H.A. 1989. Effects on nitrogen supply on bulb development in onion *Allium cepa* L. Journal of Experimental Botany 40(219): 1155-1162.

[49] Liptay, A., Jewett, T.J., Tan, T.J., Drury, C. et van Wesenbeeck, I. 1997. Effect of fertigation on processing tomato production in two sandy loam soils. Acta Horticulturae. 449(1): 349-353.

[50] Rowse, H.R. 1988. Starter fertilizer and insecticide injection from the seed drill. The Grower 110: 22-24.

[51] Hoyt, G.D., Sanders, D.C., Garrett, J.T., Batal, K.M., Davis, J.M., Decoteau, D.R. et Dufault, R. J. 1994. Nitrate movement in southeastern coastal plain soils under conservation-tilled vegetable production. Dans: Bauer, P.J. and Busscher, W.J., (eds.). Proceedings of the 1994 Southern Conservation Tillage Conference for Sustainable Agriculture. Columbia, South Carolina, USA. pp.120-123.

[52] Varvel, G.E. et Peterson, T. 1992. Nitrogen fertilizer recovery by soybean in monoculture and rotation systems. Agronomy Journal 84(2): 215-218.

[53] Gangbazo, G. 2000. Relations empiriques entre les utilisations du territoire agricole et la qualité de l'eau des rivières. Vector environnement. 33(2): 42-49.

[54] Demarais, G., et Breune, I. 1998. Diagnostique agro-environnemental de la tête du bassin versant du ruisseau Corbin. Québec; Centre de Développement d'Agrobiologie. 37 pp.

Références pour tableaux et figures

Barton, L., McLay, C.D.A., Schipper, L.A. et C.T. Smith. 1999. Annual denitrification rates in agricultural and forest soils: A review. Australian Journal of Soil Research 37: 1073-1093.

Demarais, G., et Breune, I. 1998. Diagnostique agro-environnemental de la tête du bassin versant du ruisseau Corbin. Québec; Centre de Développement d'Agrobiologie. 37 pp.

LVG Hannover-Ahlem
Résultats des expériences effectués à la Station de Recherche en Horticulture Hannover-Ahlem, Basse Saxe, Allemagne du Nord. Les expériences ont été réalisées par l'équipe de la station de recherche et les étudiants de l'Université de Hanovre dans le cadre de leurs travaux de thèse sous la direction de H.-C. Scharpf et U. Weier entre 1980 et 1997. Ces publications, sous le système allemand de formation, ne sont pas rendues disponibles dans les périodiques spécialisés. Pour plus ample de renseignements, contacter :
Ulrike Weier
Lehr- und Versuchstanstalt für Gartenbau
Heisterbergallee 12
30453 Hannover, Germany
e-mail: lvg.ahlem@lawikhan.de or weier@lawikhan.de

Malhi, S.S. et Nyborg, M. 1986. Increase in mineral N in soils during winter and loss of mineral N during early spring in north-central Alberta. Canadian Journal of Soil Science 66: 397-409.

Scharpf, H.-C. 1991. Stickstoffdünung im Gemüsebau. AID-Heft 1223. Bonn; Auswertungs-und Informationdienst für Ernährung, Landwirstschaft und Forsten e.V.

Scharpf, H.-C. et Wehrmann, J. 1991. Nitrat in Grundwasser und Nahrungspflanzen. AID-Heft 1136. Bonn; Auswertungs-und Informationdienst für Ernährung, Landwirstschaft und Forsten e.V.

Schrage, R. 1990. Methoden zur Bestimmung des Stickstoff-Düngerbedarfs von Gemüsekulturen mit geringem analytischen Aufwand. University of Hannover Doctoral Thesis.